VIAJE A PLUTON • EMISORES INALAMBRICOS DE DATOS

INVESTIGACION y CIENCIA

JULIO 2002
5 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LA ATEROSCLEROSIS Y SU DESARROLLO

- Los pigmentos de las iluminaciones
- Luz extrema
- Evolución de las ballenas
- Recombinación homóloga del ADN





Julio de 2002 Número 310

SECCIONES

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNACIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

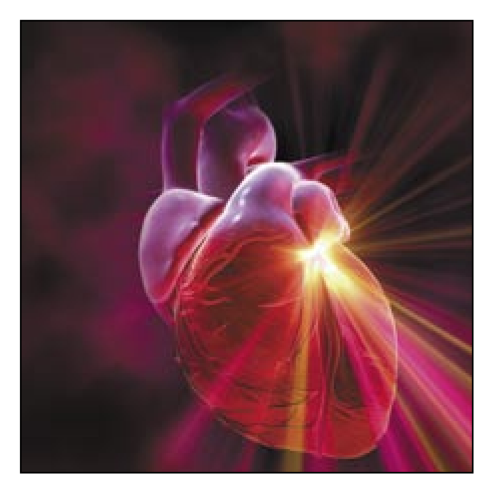
GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisót., centro, izda.
28009 Madrid
Tel. 914 097 045
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Stefan Pohl: *Los pigmentos de las iluminaciones*; Esteban Santiago: *Una nueva teoría sobre la aterosclerosis*; Joandomènec Ros: *Los mamíferos que conquistaron el mar*; Juan Pedro Adrados: *Viaje al planeta más lejano*; Ramón Pascual: *Luz extrema*; Luis Bou: *Replanteamiento del mercado ecológico*, *Aventuras problemáticas* y *Apuntes*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Curiosidades de la física, Ideas aplicadas* y *Apuntes*



Portada: Jeff Johnson, Hybrid Medical Animation

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	55,00 euro	100,00 euro
Extranjero	80,00 euro	150,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,00 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

PÁNICO ROJO. «Los científicos de EE.UU. están tropezando con dificultades a la hora de conseguir permisos de viaje al extranjero. El caso más reciente que se haya hecho público ha sido el de Linus Pauling, director del departamento de química e ingeniería química del Instituto de Tecnología de California. Tenía planeado asistir a una congreso de la Regia Sociedad de Londres sobre estructuras proteínicas. Según él mismo cuenta, un funcionario del Departamento de Estado le informó de que la decisión se había tomado “porque sospechaban que yo era comunista y mis declaraciones anticomunistas no habían sido tan contundentes como cabría desear”. Pauling declaró que no era comunista y comentó que en la Unión Soviética habían atacado su teoría de las resonancias de la combinación química. Ha vuelto a solicitar un pasaporte y escrito al Presidente Truman.»

...cien años

EL PUENTE MÁS LARGO. «Se ha concluido el último cordón de los cuatro grandes cables que soportarán el imponente tablero del nuevo puente sobre el East River, entre Brooklyn y Manhattan (*véase ilustración*). Cada cable mide 900 metros de longitud entre anclajes. La luz entre los pilones centrales es de casi 500 metros. La resistencia a la rotura media de cada cable roza las 15 toneladas por centímetro cuadrado; es una auténtica maravilla, que pone a estos cables, en lo que respecta a la resistencia a la tracción, muy por delante de cualquier material empleado hasta ahora en la construcción de puentes.» [*Nota de la redacción: El de Williamsburg, inaugurado en 1903, fue el mayor puente colgante del mundo hasta 1924.*]



El puente colgante más largo del mundo, en construcción en 1902

RADIOASTRONOMÍA. «El señor Charles Nordmann ha explicado los experimentos que emprendió en el observatorio del Mont Blanc para determinar si el Sol emite ondas de naturaleza electromagnética. Tendió una antena de mástiles horizontal, de 170 metros de largo, en el glaciar de Bossons, sobre soportes de madera aislantes, de modo que los rayos solares incidieran directamente sobre ella. Se valió también de un cohesor, introducido en un recipiente con mercurio. Repitió varias veces el experimento, con buen tiempo, el 19 de septiembre, pero no se observó desviación alguna en el galvanómetro. Parece probar que el Sol no emite ondas electromagnéticas, o que las atmósferas solar o terrestre las absorben.» [*Nota de la redacción: los experimentos positivos de Karl Jansky en 1931 se consideran el origen de la radioastronomía.*]

ECOLOGÍA AVANT LA LETTRE. «Los comisarios de las pesquerías escocesas han adoptado un ingenioso ardid para estudiar las migraciones de los salmones. Han marcado un gran número de peces, incubados a partir de las huevas depositadas el año pasado en el río Tweed, rodeando su cuerpo con un cinto o aro de caucho numerado y fechado. Se desea que los pescadores que se hagan con esos peces tomen nota de su peso, el lugar y fecha de la captura, y otros detalles diversos citados en las instrucciones. La idea es novedosa y divertida.»

...ciento cincuenta años

REVOLUCIÓN COSTURERA. «En 1847 no había funcionando ni una máquina de coser en Estados Unidos, ni acaso en el mundo. Ahora hay, creemos, unas quinientas. Esperamos que den lugar a una revolución social, ya que una buena ama de casa podrá coser una camisa de calidad en sólo una hora con una de estas pequeñas máquinas. El tiempo así ahorrado a esposas, modistas y costureras es de importancia incalculable. Las jovencitas dispondrán de más tiempo para el trabajo decorativo (sería mejor para ellas que se dedicasen más a él). Suponemos que, en pocos años, vestiremos todos camisas, chaquetas, pantalones, botas y zapatos —todas y cada una de las prendas que viste el género *Homo*— cosidos y acabados con la Máquina de Coser.»

SISMOLOGIA Y SISTEMAS COMPLEJOS

Relatividad sísmica

Per Bak, Kim Christensen, Leon Danon y Tim Scanlon, del Colegio Imperial de Londres, han obtenido, a partir del análisis de un catálogo de 335.076 terremotos sucedidos en una parte de California entre 1984 y 2000, una nueva ley de la distribución estadística de los sismos. Publicaron sus resultados en el número del 29 de abril de *Physical Review Letters.* Hasta ahora se suponía que las réplicas obedecían a un mecanismo geológico de relajación distinto del que opera en terremotos principales. La nueva ley ofrece una visión unificada de la actividad sísmica.

Según la ley clásica de Ornori, la probabilidad de que haya una réplica a un terremoto viene a ser proporcional a la inversa del tiempo transcurrido. La nueva ley afirma que la probabilidad de que haya un terremoto de magnitud mayor que *m* en una zona de lado *L* durante un intervalo de tiempo *T* es igual a la inversa de *T* multiplicada por una función de cierta variable; esta variable, única, combina *T*, *L* y *m* y se interpreta como una medida del número medio de terremotos de magnitud mayor que *m* en una zona de lado *L* en el intervalo *T*. (La medida en cuestión viene dada por dos leyes empíricas ya conocidas.) Hasta un valor crítico de esa variable, la función es constante y se mantiene la ley de Ornori; sobrepasado, la función desciende bruscamente y la probabilidad cae más deprisa que con la ley de Ornori. En el primero de estos dos regímenes, los terremotos están correlacionados: pertenecen a una secuencia de réplicas; en el segundo, son independientes: todos son principales. Ahora bien, para diferentes escalas de los valores de *L* o *m*, las escalas temporales en que la variable única cae en el intervalo donde los sismos están correlacionados serán a su vez distintas; llegarán a las decenas de años incluso. La sorprendente conclusión es la relatividad de las nociones de terremoto principal y de réplica; la distinción depende de las magnitudes de los temblores y las distancias que se consideren.



Devastación en Puli, Taiwan central, tras un sismo de magnitud 7,3 y sus réplicas, el 22 de septiembre de 1999

ROBYN BECK, ©AFP/CORBIS

"No se pueden entender los terremotos por separado", dice Christensen. Los órdenes de cosas de esta naturaleza caracterizan a los llamados sistemas críticos autoorganizados, cuyo ejemplo clásico son las avalanchas en un montón de arena.

FISICA FUNDAMENTAL

Constantes variables

¿Son constantes las constantes fundamentales de la física? Un grupo de astrónomos anunciaba en 2000 que la llamada constante de estructura fina, o alfa, el cociente adimensional del cuadrado de la carga del electrón y el producto de la velocidad de la luz *c* por la constante de Planck $\hbar$, no era tal constante: había variado a lo largo de la historia del universo (Webb *et al*, arXiv: astro-ph/0012539, en xxx.lanl.gov; *Physical Review Letters* 87, 091301, 2001). Mediciones anteriores, en el laboratorio o en minas de uranio, sólo habían podido ponerle máximos al cambio. ¿Qué se ha alterado con el tiempo, la carga del electrón o la velocidad de la luz? ¿O se trata de una combinación de efectos?

Empecemos por aclarar conceptos. Con unas unidades en que las distancias se midan en segundos, la velocidad de la luz se convierte en un mero número adimensional, un uno, y desaparece de las ecuaciones. Cabe argüir que la frase "la velocidad de la luz es (o no) constante" carece de sentido porque depende de la elección de unidades, un acto arbitrario; el significado se encierra en que sea o no constante cuando la elección se materializa en una opción muy determinada de reglas y relojes: dando el valor uno de duración temporal a los ciclos —constantes, entonces, por definición— de unos sistemas periódicos concretos, establecidos por la tradición experimental y la vivencia común del tiempo, pero no por la teoría, que no impone unas unidades u otras. (Alfa, en cambio, es un número puro, alrededor de 1/137, una medida de la intensidad de la interacción electromagnética; de él dependen la fuerza con que los electrones se ligan al núcleo atómico y, por tanto, las frecuencias de los fotones emitidos en las transiciones de los electrones entre capas. Esa dependencia varía según el tipo de transiciones.)

Pero, ¿qué decir de las constantes fundamentales dimensionales? Michael Duff se inclina por abandonar dicho concepto por completo, pero Lev Okun cree que debe tomarse como tales a *c*, a la constante gravitatoria de Newton *G* y a $\hbar$; Gabriele Veneziano las reduce a dos, *c* y una longitud fundamental de la teoría de cuerdas, porque expresan, sin redundancia, escalas básicas donde los fenómenos físicos cambian de naturaleza. Exponen sus razones en el "triálogo" que publicaron a finales de 2001 en la Red (physics/0110060, *Journal of High Energy Physics* 203, 023). Okun sostiene que igualar la velocidad de la luz a 1, convertirla en una magnitud adimensional, no es compatible con el significado ordinario de la pala-

bra "velocidad", y que sin ese significado los físicos no podrían compartir sus experimentos. La práctica rompe la igualdad entre las unidades. Esa ruptura tiene lugar en la interfaz entre la teoría y las mediciones —y quienes la efectúan—, con el poso de la historia a cuestas.

João Magueijo hablaba en el número de marzo de 2001 de *Investigación y Ciencia* de una teoría, creada por él mismo y por Andreas Albert y John Barrow, entre otros, donde la velocidad de la luz varía. Magueijo y Barrow, con Håvard Sandvik, explicaban en febrero de 2002 (astro-ph/0202374) en qué sentido debe entenderse esa variabilidad de la velocidad de la luz con mayor claridad que en ocasiones anteriores. Su teoría es una modificación de la relatividad general que incluye la variación de alfa. La expresión más simple de sus ecuaciones se logra con c variable; mediante un cambio de unidades c se vuelve constante, pero la forma de las ecuaciones resulta mucho más farragosa. Plantean otra teoría, que toma su forma más sencilla dejando que la carga eléctrica varíe. Las predicciones de una y otra son distintas: una de las diferencias es que, según la segunda, alfa decrece con el tiempo; según la primera, crece. Si creemos a Webb *et al* lo cierto es esto último: obtuvieron que alfa valía unas siete partes por millón menos hace miles de millones de años.

La radiación cósmica de fondo ofrece otro calibre cósmico de las posibles variaciones de alfa. Es compatible con que no haya cambiado alfa o con que haya variado en menos de un cuatro por ciento a lo largo de casi toda la historia del universo (Martins *et al*, astro-ph/0203149). Pero la incertidumbre de otras magnitudes condiciona ese débil resultado; por ejemplo, si la densidad de bariones del universo fuese menor, el resultado indicaría un cambio de alfa. Por otra parte, parece ser que Webb ha afinado su detección de la variación de alfa hasta una precisión comparable con la del descubrimiento de la aceleración de la expansión del universo. Este resultado, excepcional también, se acepta; la variación de alfa permanece, sin embargo, en el limbo (Martins resume el estado de la cuestión en astro-ph/0205504).

CEREBRO Y CONDUCTA

Pautas imaginarias

Suelen creer los jugadores que tras una serie de pérdidas les toca ganar. Parece que ahora se han localizado en el cerebro unas zonas a las que se debería, en parte, este error del raciocinio. Valiéndose de la técnica de formación de imágenes por resonancia magnética funcional, unos investigadores de la Universidad de Duke han descubierto una región cerebral que busca automáticamente pautas en los hechos, reales o imaginarias. Cuando a los voluntarios se les mostraban secuencias aleatorias de círculos y cuadrados, aumentaba el flujo sanguíneo hacia el córtex prefrontal, que interviene en la memorización momento a momento. Esa capa cerebral reaccionaba siempre que se violaban los patrones a que parecían atenerse, a corto plazo, las secuencias pese a que los sujetos sabían que eran aleatorias.

Mientras, otros investigadores de la Universidad de Michigan descubrían que era más probable que los voluntarios hiciesen apuestas mayores y más arriesgadas a los pocos segundos de haber perdido una. Unos cascos equipados con electrodos revelaron que cuando entraban en conocimiento de que habían perdido o ganado una apuesta, la actividad eléctrica aumentaba en el córtex frontal medio, situado tras el prefrontal. *—Charles Choi*



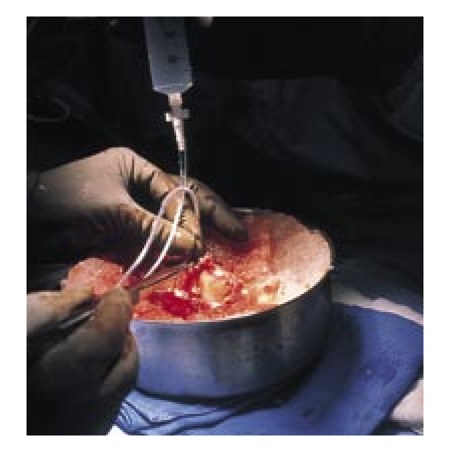
Nuestro cerebro busca patrones incluso cuando no los hay

MEDICINA

Rechazo de trasplantes

Amén de la escasez de órganos, el mayor problema de los injertos de tejidos donados es el rechazo. No se había podido descubrir qué desencadenaba este proceso letal. Ahora, bioquímicos de la Universidad de Pennsylvania afirman que ciertas células, por lo demás inocuas, que revisten los vasos sanguíneos de los injertos podrían activar las células defensoras del sistema inmunitario, las células *T*, y provocar el rechazo crónico. Hallaron, al estudiar trasplantes de corazón de ratones, que las células de los vasos sanguíneos de los órganos donados pueden inducir la agresión directa de las células *T* asesinas. El ataque crea cicatrices en el corazón trasplantado y el riesgo de complicaciones mortales va creciendo al engrosarse las paredes de las arterias. El conocimiento de las posibles causas del rechazo podría conducir a nuevos procedimientos que atenúen la respuesta inmunitaria.

—Charles Choi



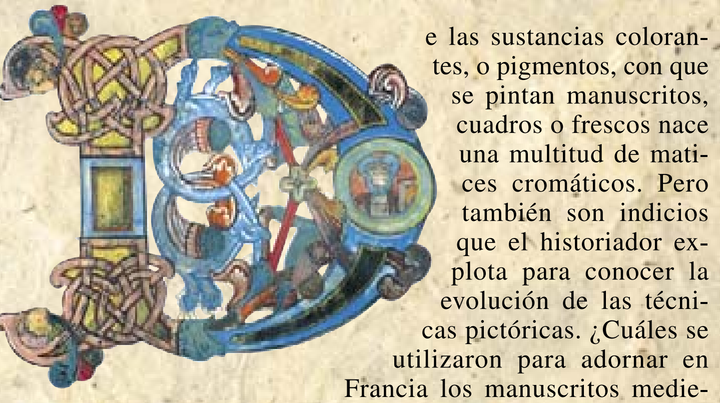
El rechazo de órganos, como el de este riñón, puede ser provocado por células de los vasos sanguíneos

TIM FLACH *Stone* (*arriba*); MICHELLE DEL GUERCIO *Photo Researchers, Inc.* (*abajo*)

Los pigmentos de las iluminaciones

Sabemos ahora la composición de los pigmentos con que se ornaron los manuscritos de la Edad Media y la evolución de su uso a lo largo del tiempo

Claude Coupry y Marie-Thérèse Gousset



De las sustancias colorantes, o pigmentos, con que se pintan manuscritos, cuadros o frescos nace una multitud de matices cromáticos. Pero también son indicios que el historiador explota para conocer la evolución de las técnicas pictóricas. ¿Cuáles se utilizaron para adornar en Francia los manuscritos medievales? ¿Tienen un origen mineral, vegetal o animal? ¿Son naturales o sintéticos? ¿Cambia la elección de los pigmentos según las épocas o el lugar de producción de los manuscritos? Para responder estas preguntas hemos recurrido a la microespectroscopía Raman, que tiene la inestimable ventaja de identificar los pigmentos sin causar daño a las obras. Con el fin de interpretar los resultados en el contexto histórico en que se crearon los manuscritos, escogimos un conjunto de obras, conservadas en la Biblioteca Nacional de Francia, que se realizaron en la abadía de la Trinidad de Fécamp en los siglos XI y XII: se sabe con precisión dónde se elaboraron y en qué época. Más aún, estas investigaciones esclarecen los métodos de trabajo de los talleres de copiado.

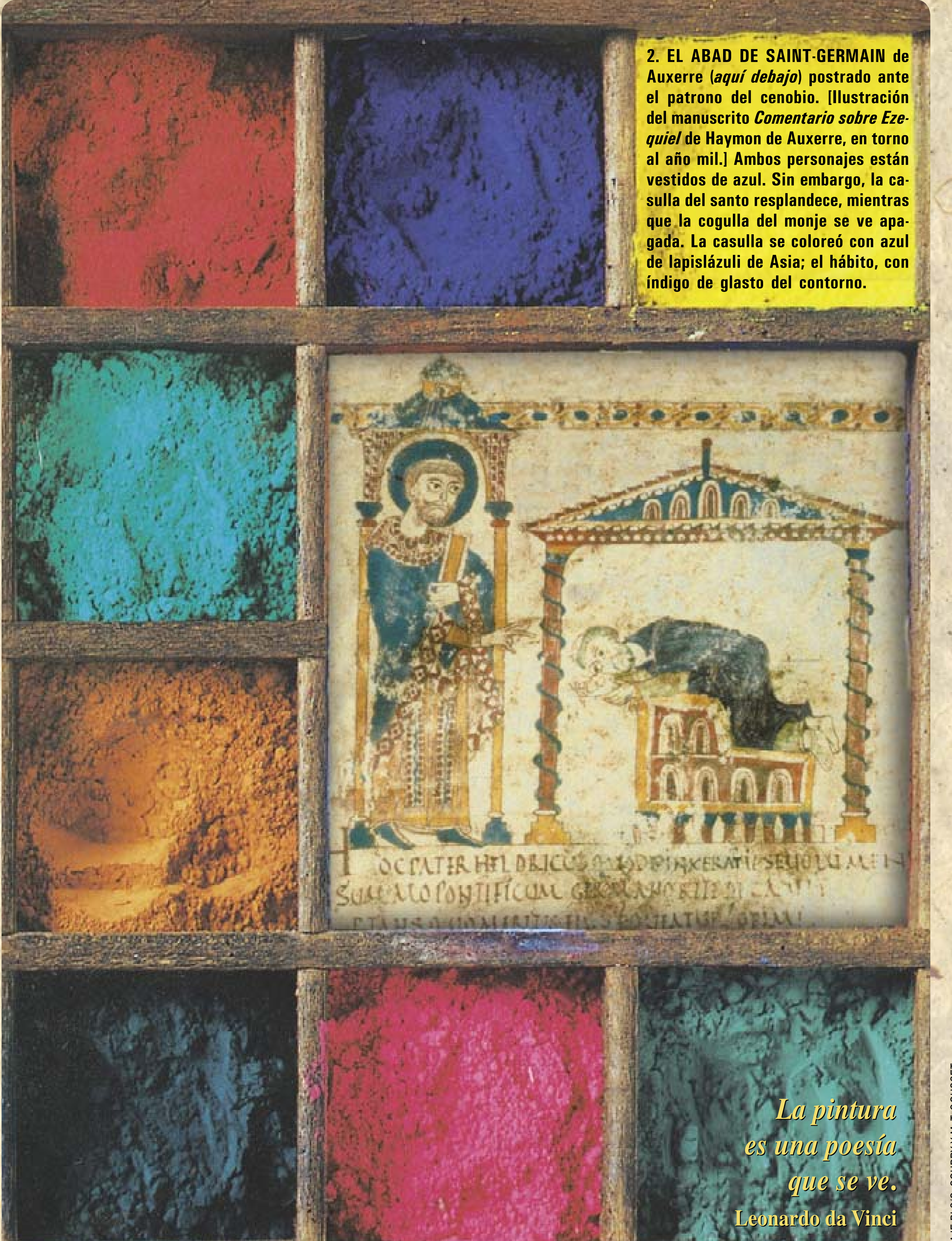
La abadía de Fécamp se fundó en el año 658. Durante las invasiones escandinavas, en 876, los monjes fueron exterminados y los edificios quedaron totalmente destruidos; ningún manuscrito de esta época subsistió. En 911 la región recobra la paz gracias al tratado de Saint-Clair-sur-Ept, por el cual el rey de Francia Carlos II cede a Rollon, el jefe de los hombres del Norte, una parte de Neustria, que toma el nombre de Normandía. Los condes, y después los duques, normandos reconstruirían la abadía de la Trinidad, donde Ricardo I instalará a unos religiosos a finales del siglo X. Considerando necesaria una reforma, en 1001 Ricardo II hizo venir a monjes de la abadía de Cluny (en Borgoña). Bajo el impulso de un nuevo abad, los años entre 1028 y 1078 inauguran un período próspero en el que se establecen relaciones muy estrechas con la abadía del Mont-Saint-Michel y, fuera de la provincia, intercambios con los monasterios de más allá del Canal. Los vínculos con Mont-Saint-Michel quedan ilustrados por un ejemplar del *Tratado sobre la Trinidad* de san Agustín (*véase la figura 1*), cuya decoración muestra numerosas similitudes con obras surgidas del taller de copia de allá. El copista de este tratado trabajó para las dos abadías.

1. EL FLORECIMIENTO ARTISTICO y la renovación estilística de la abadía de la Trinidad de Fécamp entre 1028 y 1078 se reflejan en esta letra florida, tomada del *Tratado sobre la Trinidad* de san Agustín.

El origen de los manuscritos

En Fécamp, este período corresponde también a un florecimiento artístico y una renovación estilística que toman prestados elementos ornamentales del estilo francosajón, extendido en toda Neustria, heredero a su vez del estilo carolingio y reconocible por sus entrelazados y motivos vegetales (*véase la figura 3*). Está clara la influencia de las obras inglesas, facilitada por las circunstancias históricas y más tarde por la conquista normanda de Inglaterra en 1066. Así, en algunos manuscritos de Fécamp aparecen unos marcos vegetales que rodean las pinturas, y en ocasiones el texto, característicos de la escuela de Winchester. No obstante, el arte normando es más sobrio que el inglés; busca la pureza de líneas. Esta tendencia no se da sólo en las iluminaciones, sino también en arquitectura y escultura.

Tras una decadencia de unos treinta años, la actividad del taller de copia de Fécamp conoce una segunda renovación, entre 1108 y 1139: a finales del



2. EL ABAD DE SAINT-GERMAIN de Auxerre (*aquí debajo*) postrado ante el patrono del cenobio. [Ilustración del manuscrito *Comentario sobre Ezequiel* de Haymon de Auxerre, en torno al año mil.] Ambos personajes están vestidos de azul. Sin embargo, la casulla del santo resplandece, mientras que la cogulla del monje se ve apagada. La casulla se coloreó con azul de lapislázuli de Asia; el hábito, con índigo de glasto del contorno.

MONTAJE PLS/C. COUPRY Y M. T. GOUSSET

siglo XII, en la biblioteca de Fécamp están catalogados 176 manuscritos, mientras que a finales del XI no contaba más que con 87. Al lado de los libros litúrgicos ocupaban un lugar importante los textos de los padres de la Iglesia, como san Agustín, san Gregorio o san Jerónimo, de teólogos de la época carolingia e incluso de autores del propio siglo XII. Por último, la biblioteca poseía *Vidas de Santos*, libros de sermones y algunas obras históricas.

Este patrimonio se dispersó en parte en el transcurso de los siglos siguientes. Algunas obras fueron adquiridas por coleccionistas y entraron enseguida en las colecciones reales; hoy se las conserva en la Biblioteca Nacional de Francia. Durante la Revolución, los fondos de la biblioteca de la abadía se trasladaron a Rouen, donde se los guarda todavía.

Letras floridas e iniciales

Los manuscritos que hemos estudiado se remontan a la época que se extiende de finales del siglo X a principios del XII; elegimos manuscritos representativos de cada uno de los períodos citados (*véase la figura 4*).

La abadía era un centro de vida espiritual e intelectual; parte integral de ésta era la copia de libros. Se ignora cómo se organizaba este trabajo en Fécamp, pero las numerosas representaciones de copistas muestran que trabajaban sobre planchas colocadas sobre las rodillas o sobre pupitres inclinados: disponían de un cuerno de bovino a manera de tintero, de una caña o pluma de oca a la que le cortaban el extremo, de un raspador y de plomos para mantener el pliego de pergamino en su lugar. El pergamino era una piel sin curtir de cabra, de borrego o de ternero. Tras la eliminación de la grasa y los pelos con un raspador, y después con una piedra pómez, las pieles se adelgazaban, suavizaban y blanqueaban. Entonces se recortaban en hojas rectangulares, dobladas para formar un cuaderno. Líneas horizontales y verticales, trazadas con una 'punta seca', guiaban la escritura del texto, en líneas largas, dos columnas u otros formatos.

Los manuscritos poseen diferentes tipos de ornamentaciones. De las más simples, las iniciales de un solo color, se encargaba el escriba. Otras iniciales están elaboradamente ornadas con entrelazados vegetales habitados por hombres y animales. Eran obra de artistas que en ocasiones trabajaban para varias abadías. Muy pronto, ya en el siglo XII, trabajaron artistas laicos en los monasterios, como Félix, en Corbie, cerca de Amiens, en 1164. En uno de los manuscritos que decoró se representó a sí mismo y mencionó su propio nombre. Que vista ropa corta y no esté tonsurado indica su condición. Para pintar disponía de pinceles de pelos de marta o de ardilla, morteros para moler los pigmentos, conchas para conservarlos y paletas para mezclarlos con el aglutinante.

Regresemos a los manuscritos de la abadía de Fécamp. Los colores (el azul, el rojo, el amarillo y el verde, además del negro y el blanco) son puros y saturados. La calidad de la capa pictórica y el cuidado con el que fue aplicada muestran el grado de perfección de los trabajos del taller de copia.

Tomamos 98 muestras de los nueve manuscritos estudiados, repartidas entre los diferentes tipos de decoración: iniciales simples y letras historiadas. Con el fin de no estropear la decoración las hemos extraído de las partes defectuosas. Cuando la capa pictórica de una hoja de un manuscrito no está todavía seca por completo en toda su profundidad, los frotamientos entre las hojas acarrean en ocasiones que se desprenda pintura sobre la hoja adyacente, en particular si la atmósfera es húmeda. Estas "descargas", perceptibles a simple vista o con lupa, se reconocen porque concuerdan con una alteración en la superficie de la letra de donde surgieron. Igualmente, tomamos muestras de las minúsculas salpicaduras debi-

3. LA INFLUENCIA del estilo carolingio, que se caracteriza por entrelazados y arcadas adornadas con hojas de acanto, se trasluce en esta ornamentación de un manuscrito de Fécamp de finales del siglo X.

das al ataque de la pluma sobre el pergamino.

A continuación realizamos los análisis mediante microespectroscopía Raman, que explota las modificaciones que experimenta la luz de un láser cuando se dispersa en un objeto. Las frecuencias del espectro obtenido están relacionadas con las vibraciones de los átomos de la muestra: dependen de la naturaleza de los átomos, de las distancias que los separan y de las fuerzas interatómicas entre ellos y los constituyentes del entorno. El espectro Raman de una muestra refleja su composición molecular y su estructura cristalina. Es una verdadera huella del producto, que permite determinar su composición química por comparación con los espectros de referencia. Cuando se enfoca el láser sobre la muestra a través de un microscopio, la zona iluminada, y por tanto analizada, es del orden del micrómetro cuadrado. Así se estudian micromuestras que pesan unos nanogramos y cuya extracción no causa daño a las obras. Observadas al microscopio, se distinguen granos de color de unos diez micrómetros de diámetro, mezclados con el aglutinante. Los pigmentos se identifican enfocando el haz de láser sobre esos granos.

FECHA DEL MANUSCRITO	LOCALIDAD DE ORIGEN	INDIGO	AZUL DE LAPISLAZULI	MINIO	BERMELLON
FINES DEL SIGLO X	FECAMP	●		●	
1000	AUXERRE	●	●		
1001-1028	FECAMP		●	●	
1028-1078	FECAMP		●	●	
1028-1078	FECAMP		●	●	●
1028-1078	FECAMP		●	●	●
1028-1078	FECAMP				●
1028-1078	FECAMP		●		●
1078-1108	FECAMP		●		●
1108-1139	FECAMP		●		
1100-1125	CORBIE		●		
1160	CORBIE		●		
1183	CORBIE		●		

4. LOS PIGMENTOS CAMBIAN EN FUNCION DE LAS EPOCAS. En Fécamp, el azul de lapislázuli reemplaza al índigo desde principios del siglo XI. Para el rojo, la transición se realizó entre 1050 y 1070, período en que el minio fue abandonado en favor del bermellón. Para copiar e iluminar los manuscritos, los monjes trabajaban en el *scriptorium*, sobre pupitres inclinados (*al lado*). El material de los copistas consistía en un tintero y una pluma de oca tallada; el de los iluminadores, en pinceles y pigmentos.

Vulgar indigotina y precioso lapislázuli

Nos hemos interesado particularmente en los pigmentos azules y rojos. En lo que a los azules se refiere, el análisis del manuscrito más antiguo, que data de finales del siglo X, mostró sólo la presencia de indigotina, la sustancia química colorante de los pigmentos índigos; no deben confundirse con la planta llamada índigo o añil, que es sólo una de las numerosas de donde se extrae ese producto natural. Una de estas plantas con las que se hacía índigo era el glasto (*véase la figura 5*), que se cultivó en Europa durante la Edad Media en suelos húmedos y arcillosos, sobre todo en Francia; más en concreto, había producción en Picardía, en Normandía y, sobre todo, en el Languedoc, tierra que hizo fortuna con la hierba pastel (otro nombre del glasto).

Nos han llegado documentos que versan sobre la manera en que los tintoreros preparaban la indigotina a partir del glasto. En las hojas, sobre todo, se encuentra un precursor incoloro de la indigotina; va asociado a otras sustancias, entre ellas, en poca cantidad, las colorantes. Las hojas, recolectadas y trituradas en un molino, hacían una pasta homogénea que se dejaba fermentar. En el transcurso de esta fermentación se formaba la indigotina por oxidación. Los baños de tintura se preparaban añadiendo agua a la pasta, que en ocasiones se almacenaba en forma de bolas. En la superficie se generaba una espuma azul, o flor de índigo, que contenía la indigotina. Se podía entonces utilizarla como tinte, era lo más frecuente, o como pintura.

¿Preparaban los monjes sus propios pigmentos o se los adquirían a tintoreros o boticarios? En Normandía, región de cultivo del glasto, las dos hipótesis son verosímiles. Los panes de índigo podían ser productos de importación: ya en la Antigüedad, Plinio refiere que llegaban de las Indias, obtenidos a partir de la planta añil siguiendo un modo de preparación similar.

El manuscrito en que identificamos la indigotina contiene dos tintes azules, uno puro y otro verdeazulado. Los análisis mostraron que ambos se confeccionaron con indigotina. La diferencia de tono se debe al aglutinante o al pigmento mismo. En efecto, según la edad de la planta, la madurez de las hojas, los procesos de extracción y las condiciones de la tinción (particularmente la acidez del baño), variará la proporción de productos asociados al índigo en el vegetal o fijados sobre el textil, de la que depende el tono.

En los demás manuscritos estudiados, el azul es profundo y luminoso. El análisis de los granos muestra que son de azul de lapislázuli, también llamado lazulita (el azul ultramar natural). El lapislázuli es una piedra semipreciosa; las principales minas conocidas en la Edad Media estaban en Afganistán. En



la lazulita, que es un silicato de aluminio ($Na_{8-10}Al_6Si_6O_{24}S_{4-2}$), las proporciones de sodio y de azufre varían. El color de este pigmento se debe al azufre. En estado natural, el azufre se encuentra en forma de moléculas cíclicas o de macromoléculas y es amarillo. En cambio, en la lazulita se encuentra siempre en forma iónica: los iones S_3^-, mayoritarios, absorben la luz roja y son azules, mientras que los iones S_2^-, minoritarios, absorben la luz azul y son rojos. Cuando la proporción de iones S_2^- es débil, el tinte del pigmento es azul; cuando aumenta, el tinte tiende hacia el violeta.

5. EL AZUL empleado en los manuscritos de Fécamp era, o bien el azul de lapislázuli, extraído de la piedra proveniente de Afganistán (*1*), molida y purificada (con este pigmento se ejecutó la decoración de la letra reproducida aquí arriba), o bien el índigo, sacado del glasto (*2 y 3*), planta cultivada en Normandía. En otros manuscritos se encuentra también azul de azurita (*4*), piedra de la que existían varias minas en Europa.









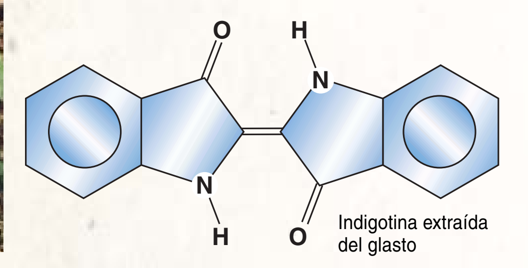
D. CARDON

En el lapislázuli, la lazulita está mezclada sobre todo con otros silicatos, con calcita (carbonato de calcio) y con pirita (sulfuro de hierro). Cuando la piedra se muele, se obtiene un pigmento azul grisáceo, pálido y sin brillo. Para eliminar las impurezas se incorpora la piedra molida a una mezcla de resinas, ceras y aceites, y luego se amasa esta pasta en agua. Las impurezas se quedan en la pasta; el pigmento se separa mediante lavados y decantaciones sucesivas. Debido a su lejano origen y a lo prolongado de las operaciones de purificación, el azul de lapislázuli era un producto muy gravoso.

En las muestras tomadas en las zonas azulgrisáceas se observan con el microscopio minúsculos granos negros entre los granos azules: es negro de carbono. El artista mezclaba este producto con el azul de lapislázuli para obtener diferentes tintes de azul a partir de un mismo pigmento. En cambio, las zonas de azul pálido no contienen partículas blancas: las variaciones de saturación se obtenían por dilución del azul de lapislázuli en el aglutinante, y no por adición de un pigmento blanco.

En el conjunto de los manuscritos de la abadía de Fécamp conservados en la Biblioteca Nacional de Francia el azul aparece con frecuencias muy variables: nunca o una sola vez en algunos, y con tanta frecuencia como el rojo en otros. Excepto en el manuscrito más antiguo analizado, que contiene índigo, los otros ocho no llevan más que azul de lapislázuli. Estos dos pigmentos son estables: mezclados a un aglutinante, no evolucionan. Hoy en día, los intensos azules de estos manuscritos presentan el mismo aspecto que probablemente ofrecían en la época de su realización.

En lo que respecta al rojo, el estudio se hizo a partir de los mismos manuscritos que para el azul. Se



Indigotina extraída del glasto

identificaron dos pigmentos. Algunas letras tienen un rojo más o menos anaranjado. Su espectro Raman muestra que los pigmentos son óxidos de plomo: según el punto analizado, se identifica unas veces minio (Pb_3O_4), otras masicote (PbO, amarillo) y algunas una mezcla de los dos.

Minio y cinabrio rojo

El tinte de la mezcla varía ligeramente y tiende hacia el anaranjado cuando la proporción de masicote aumenta. El minio escasea en estado natural; en la Edad Media se preparaba a partir del masicote, que se obtenía por oxidación del plomo o por transformación del blanco de plomo (un carbonato básico de plomo); para ello, se calentaba primero el blanco de plomo y después el masicote, a fin de oxidarlo y convertirlo en minio. Si la transformación era incompleta, se producía una mezcla de los dos óxidos. Se podía partir además de otros derivados del plomo: según el producto original, el horno y las condiciones de temperatura, el minio estaba acompañado de otros óxidos en proporciones variables, de suerte que se obtenían diversos matices.

El análisis muestra que, en algunas letras, el pigmento es bermellón (sulfuro de mercurio) muy puro. Esta sustancia existe en estado natural: es el cinabrio. Las minas de España proveyeron en la Antigüedad el pigmento rojo, omnipresente en las decoraciones de Pompeya. Sencillamente, se molía en el mortero; pero cuando la pureza del mineral era mediocre se obtenía un pigmento de mala calidad. La razón de que en el siglo VIII se empezara a recurrir a la síntesis fue quizás el deseo de conseguir un pigmento puro. Primero se calentaba el mineral y se le extraía el mercurio, al que se hacía reaccionar con azufre. Se formaba un sulfuro de mercurio negro, que se calentaba a su vez en un recipiente cubierto por una campana. Se sublimaba y depositaba en las paredes de la campana, donde formaba una costra cristalina marrón-rojo-violácea. Los rastros de azufre que quedaban en el bermellón podían alterar otros pigmentos (que contuvieran plomo y cobre). Había diferentes "recetas" para eliminarlos: por ejemplo, se les hacía hervir en orina. Este procedimiento se utilizaba todavía en el siglo XVI (*véase la figura 6*).

Tanto para el azul como para el rojo, nuestros resultados concuerdan con las indicaciones de la bibliografía técnica medieval, pero los resultados pusieron claramente de relieve que los pigmentos utilizados dependían de la época (*véase la figura 5*). Para el azul, se constata que sólo el manuscrito más antiguo estudiado, que data de finales del siglo X, contiene índigo. Los manuscritos posteriores están decorados exclusivamente con azul de lapislázuli, presente en las grandes iniciales y en las letras floridas. Notemos sin embargo que, de la treintena de manuscritos conservados en la Biblioteca Nacional de Francia, más de diez no incluyen azul en absoluto.

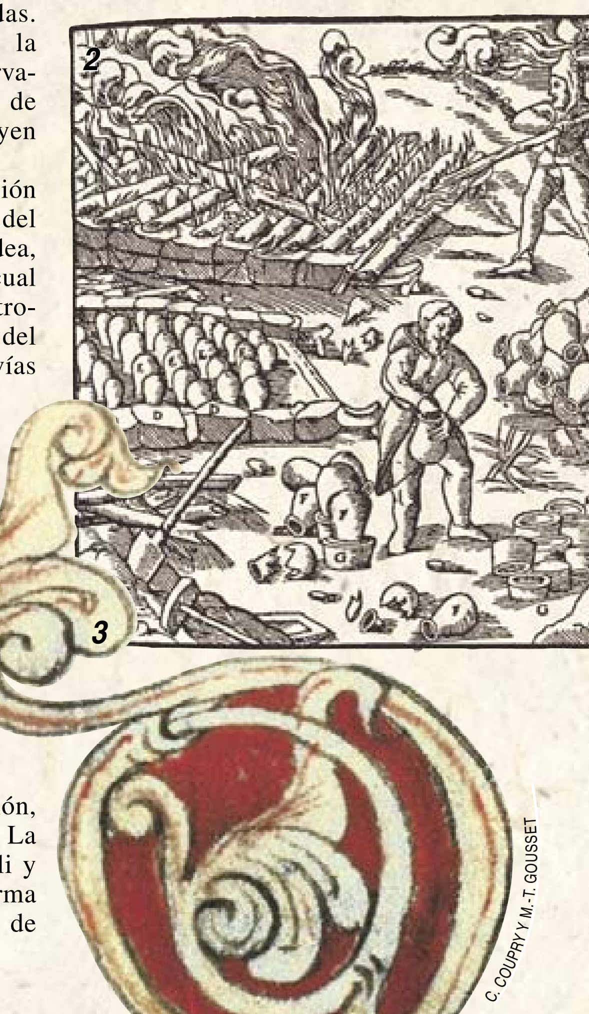
Esta permanencia de la utilización del azul de lapislázuli a partir del año mil pone en entredicho la idea, aceptada hasta ahora, según la cual este pigmento no se habría introducido en Francia hasta finales del siglo XII. Debieron de existir vías comerciales estables desde el año mil.

Como pigmento rojo, se va pasando poco a poco del minio al bermellón. Durante el período de transición, entre 1050 y 1070 más o menos, el empleo de un pigmento u otro dependía del copista. En dos manuscritos que escribieron conjuntamente dos copistas, uno utilizó el minio (y prescindió del azul), mientras que el otro recurría al bermellón, asociado al azul de lapislázuli. La asociación del azul de lapislázuli y del bermellón constituye la norma en los manuscritos de la abadía de Fécamp posteriores a 1070.

La evolución de los pigmentos

¿Hubo cambios similares de pigmentos en más abadías, de Normandía o de otros lugares, con períodos de transición contemporáneos a los de Fécamp? Para responder a esta pregunta hemos analizado manuscritos de la Biblioteca Nacional de Francia producidos en





6. EL ROJO utilizado en la abadía de la Trinidad era bermellón, obtenido al moler cinabrio (*1*) o sintetizado a partir del mercurio extraído de ese mineral y del azufre (*2*), o bien minio (un óxido de plomo), como en esta letra (*3*).

Los autores

CLAUDE COUPRY es ingeniero del laboratorio de dinámica, interacciones y reactividad del Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Thiais. MARIE-THERESE GOUSSET trabaja en la Biblioteca Nacional de Francia.

otros talleres de copia. Uno de ellos, creado en la abadía de Saint-Germain de Auxerre hacia el año mil (un ejemplar del *Comentario sobre Ezequiel* de Haymon de Auxerre), incluye una imagen a página completa que representa al abad postrado frente a san Germán (*véase la figura 2*). Los dos personajes están vestidos de azul, pero la casulla del santo es de un azul más intenso y más brillante que el del hábito del abad, que parece apagado. El análisis mostró que los pigmentos difieren: para el santo, el artista utilizó el precioso azul de lapislázuli, mientras que para el abad se conformó con índigo, producido quizás a partir de una barata planta local. La importancia jerárquica de los dos personajes, expresada por sus actitudes, se subraya con esta diferencia de pigmentos. Además, el análisis confirma la aparición del azul de lapislázuli desde los primeros años del siglo XI y la utilización en los manuscritos de índigo, empleado desde hacía mucho como tintura.

Entre los manuscritos ulteriores que hemos estudiado, provenientes de la abadía de Saint-Pierre de Corbie, cerca de Amiens, se confirma el empleo del azul de lapislázuli durante todo el siglo XII. En el manuscrito más antiguo, de principios del siglo XII, el azul no se utiliza más que cinco veces, mientras que en los otros cinco, de finales del siglo XII, abunda. El pigmento está asociado en ocasiones al negro de carbono, pero nunca a un pigmento blanco. Así, su utilización es comparable con la que se hacía en Fécamp. En Cîteaux, bajo la influencia ascética de san Bernardo, la producción del taller de copia pasa de una gran riqueza cromática y pictórica a una ornamentación monocromática sin representaciones figurativas. Esta tendencia no se extiende al pigmento: el azul de lapislázuli, presente en todos los manuscritos analizados, que se conservan en la Biblioteca Municipal de Dijon, no se abandonó por un producto menos precioso a pesar de la sobriedad impuesta por san Bernardo.

Se ha encontrado índigo en un manuscrito más tardío, iluminado en Narbona después de 1221, que forma parte de una serie de recopilaciones de normas consuetudinarias, franquicias y reglamentos. El empleo del índigo se puede deber a la naturaleza más modesta de la obra, a la proximidad de los centros de producción languedocianos de la hierba pastel o incluso a una influencia española. El pigmento rojo de este manuscrito es el bermellón.

Un sacramentario (libro de oraciones predecesor del misal) del siglo XIV, obra del sur de Francia que se conserva en el obispado de Carcasona, está decorado con un pigmento azul que no es ni índigo ni azul de lapislázuli. Se trata de azurita, abundantemente citada en la bibliografía técnica medieval. Este carbonato de cobre ha sido identificado en pinturas murales y en cuadros, de los primitivos flamencos, por ejemplo. Con frecuencia va asociado, en estado natural, a la malaquita (un carbonato de cobre verde); se explotaba en numerosas minas de Alemania y Hungría. En Francia se extrajo de las minas de Chessy, cerca de Lyon (a veces se le llamaba chessylita). Da un azul cercano al del lapislázuli aunque menos intenso y más frío, con el que tal vez se le haya podido confundir; pero cuando se comparan sus espectros Raman, las diferencias son inequívocas. Para preparar el pigmento bastaba con moler el mineral; en ocasiones se lo ponía en suspensión en agua para eliminar las impurezas. Para oscurecerlo se empleaba lejía de ceniza (carbonato de potasio).

La transmisión de las técnicas y la elección de los pigmentos por parte de los artistas medievales plantean numerosas preguntas. En la cuenca mediterránea apenas si se utilizó durante la Antigüedad otro azul que el egipcio. Es seguramente el pigmento sintético más antiguo: desde el tercer milenio antes de nuestra era se fabricaba a partir de carbonato de calcio, arena y cobre, o alguno de sus derivados. Parece que fue cayendo poco a poco en desuso. Una de las últimas obras donde ha sido identificado es el conjunto de pinturas murales de Castelseprio, en Lombardía, realizadas entre los siglos VII y IX.

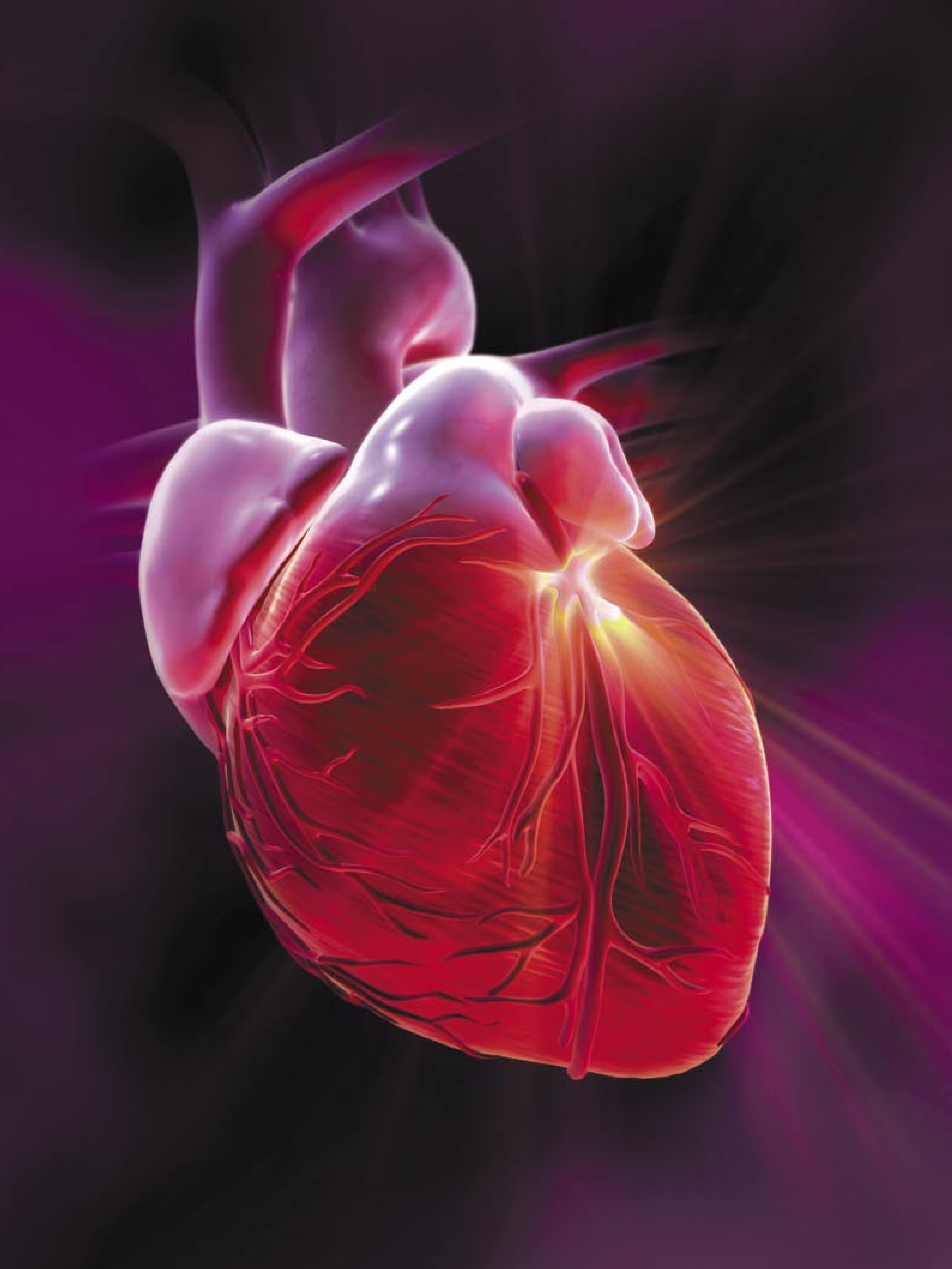
Durante la época románica, numerosos factores pudieron contribuir a los cambios de pigmentos que hemos puesto de manifiesto: la situación geográfica de las abadías normandas (y la distancia que las separaba de los centros donde se comerciaban los pigmentos), el contexto económico, razones de orden estilístico y acontecimientos históricos. La reforma monástica de principios del siglo XI puede haber desempeñado una función importante.

¿Cómo se abastecía de colores el mercado? La pregunta queda en gran parte abierta. En la época merovingia, los documentos de los archivos de la abadía de Corbie indican que los monjes iban hasta Fos, cerca de Marsella, a buscar los productos necesarios para la enfermería y el *scriptorium*, entre ellos el pigmento amarillo, el oropimente (sulfuro de arsénico). En los días del románico los artistas de Corbie compraban en el mercado de Cambrai índigo, tal vez importado. Estos pigmentos de importación provenían de las Indias. Los mercaderes árabes los compraban allí y los transportaban hasta los puertos del Mediterráneo, donde los italianos tomaban el relevo. Sin embargo, se ignora por qué el azul de lapislázuli, identificado en pinturas chinas de principios de nuestra era, llegó tan tarde a los mercados occidentales.

Bibliografía complementaria

IDENTIFICATION DE BLEU DE LAPIS-LAZULI DANS SIX MANUSCRITS À PEINTURES DU XIIe SIÈCLE PROVENANT DE L'ABBAYE DE CORBIE. B. Guineau, C. Coupry, M. T. Gousset, J. P. Forgerit, y J. Vezin, en *Scriptorium*, Tomo XL, págs. 157-171, 1986.

BLEU, HISTOIRE D'UNE COULEUR. M. Pastoureau. Editions du Seuil; París, 2000.



Una nueva teoría sobre la aterosclerosis

Cada año, las enfermedades cardiovasculares producen mayor número de víctimas que el cáncer. Dolores de pecho, infarto de miocardio y accidentes cerebrovasculares son consecuencias de la aterosclerosis, cuyo mecanismo de acción recibe aquí nueva luz

Peter Libby

Hasta hace sólo unos cinco años, los médicos habrían asegurado que la aterosclerosis era un problema de tuberías: masas cargadas de grasa van acumulándose en la superficie de las paredes arteriales, pasivas ante el ataque. Si un depósito (una placa) no deja de aumentar, terminará por ocluir el conducto afectado, evitando que la sangre alcance el tejido de destino. Privado así de oxígeno, el tejido necrosará. Si la arteria irriga el músculo cardíaco, se producirá un infarto; si se localiza en el cerebro, un accidente cerebrovascular.

Tan atildada explicación se considera hoy insatisfactoria, por simplista. Las investigaciones que comenzaron hace más de 20 años han demostrado que las arterias se parecen muy poco a las tuberías de cobre rígidas. Las paredes constan de células que se comunican constantemente entre sí y con el entorno en que se encuentran. Estas células participan en la formación y desarrollo de los depósitos de aterosclerosis, que se generan en el seno de las propias paredes vasculares, no en su superficie. Más aún, tales depósitos no suelen crecer hasta el punto de obstruir el flujo sanguíneo. La mayoría de los infartos y de los accidentes cerebrovasculares obedecen, en cambio, a la rotura de placas pequeñas, que provocan la formación de un trombo; éste bloquea la circulación.

Ha quedado establecido también que la inflamación desempeña un papel central en la aterosclerosis. Al proceso de inflamación se deben los rasgos distintivos de los cortes: enrojecimientos, hinchazones, calor y dolor. Se trata de un mecanismo que participa, además, en todas las fases de la aterosclerosis, desde la creación de placas hasta su rotura, pasando por su desarrollo. En caso de agresión por microorganismos, la inflamación ayuda a yugular la infección. Pero en la aterosclerosis constituye un inconveniente, porque las defensas del cuerpo se precipitan, lo mismo que acontece en la artritis reumatoide y otros fenómenos inflamatorios.

El nuevo marco conceptual de los mecanismos de la aterosclerosis nos faculta para una detección mejor y un tratamiento más eficaz de la patología. Se sabe ahora por qué muchos infartos irrumpen sin previo aviso y por qué ciertas terapias, destinadas a su prevención, fallan. Urge progresar en la prevención, detección y terapia de la aterosclerosis, pues los infartos y los accidentes cerebrovasculares provocan en los países

LA ATEROSCLEROSIS en una arteria que riega el corazón prepara el terreno para un infarto de miocardio.

JEFF JOHNSON *Hybrid Medical Animation*

industrializados más víctimas que el propio cáncer, una tendencia a la que han venido a sumarse las naciones en vías de desarrollo.

Un foco de ignición

Los signos externos (los accidentes vasculares) reflejan un combate sin cuartel en un campo de batalla microscópico de las arterias. Después de sentir (correcta o incorrectamente) que ha comenzado un ataque microbiano, ciertos leucocitos —vanguardia del sistema inmunitario— se congregan en el tejido amenazado, donde segregan sustancias químicas que deben limitar la infección. Entre estos productos se incluyen oxidantes (capaces de dañar al invasor) y citoquinas, proteínas señalizadoras que orquestan las actividades de las células de defensa. Conocemos que se ha desencadenado una reacción inflamatoria cuando se detectan en un tejido células inflamatorias o mediadores de su actividad.

El cuadro más claro del papel de la inflamación en la instauración de la aterosclerosis se lo debemos a las investigaciones sobre la lipoproteína de baja densidad (LDL), vulgarmente el colesterol malo. Las partículas de LDL, compuestas de lípidos y proteína, transportan colesterol (otro ácido graso) desde su fuente en el hígado e intestinos hasta otros órganos. Aunque el organismo necesita LDL y colesterol, su exceso favorece la aterosclerosis, pero no hace mucho se ignoraba todavía por qué la desmesura estimulaba la formación de placas.

Experimentos con células en cultivo y animales revelan que los problemas comienzan cuando las partículas de LDL de la sangre se acumulan en la túnica interna, o íntima, la parte de la pared arterial más cercana a la corriente sanguínea. A concentraciones razonables en la sangre, las LDL entran y salen de la íntima, constituida sobre todo por células endoteliales que tapizan la pared del vaso, por la matriz extracelular subyacente (tejido conectivo) y por células musculares lisas (productoras de matriz). Si su concentración es desmedida, las LDL tienden a adherirse a la matriz.

A medida que las partículas de LDL se acumulan, sus lípidos y sus proteínas sufren una oxidación; los azúcares se fijan sobre las proteínas (glicosilación). Las células de la pared vascular parecen interpretar tales cambios como una señal de peligro y piden refuerzos al sistema defensivo del organismo.

Las células endoteliales portan, sobre la superficie expuesta a la sangre, moléculas de adhesión que, a manera de cinta adhesiva, se unen a las células inflamatorias quiescentes: los monocitos. Esta interacción hace que las células salgan de la circulación y se fijen en la pared vascular. Las partículas de LDL modificadas instan también la secreción, por las células endoteliales y células musculares lisas de la íntima, de quimioquinas, que atraen a los monocitos. A la manera de perros de presa, los monocitos se escurren entre las células endoteliales y siguen el rastro de esas sustancias hasta la íntima.

Las quimioquinas y otras sustancias elaboradas por las células endoteliales y las células musculares lisas inducen la multiplicación de los monocitos y su transformación en macrófagos activos: guerreros pertrechados para atacar a los enemigos del organismo. Situados en la pared, detectan a los invasores. Al reaccionar ante las proteínas emitidas por las células del endotelio y de la íntima, los macrófagos se recubren de receptores de saprófitos, que capturan partículas de LDL modificadas y ayudan a los macrófagos a que las ingieran. Los macrófagos acaban tan saturados de gotas de grasa que parecen espumosos cuando se observan con el microscopio. Por esa razón los anatomopatólogos llaman células espumosas a esos macrófagos cargados de grasa.

Igual que los monocitos, los linfocitos *T* siguen a las moléculas de adhesión y a las quimioquinas en la íntima. Estos leucocitos representan otra categoría de agentes del sistema inmunitario. Los linfocitos *T* liberan citoquinas que intensifican la actividad inflamatoria en las paredes arteriales. Los macrófagos espumosos y algunos linfocitos *T* componen las inclusiones grasas, precursoras de las placas complejas que después desfiguran las arterias. (Muchos adolescentes de los países ricos muestran ya esas placas en embrión.)

Génesis de las placas

Cuando una respuesta inflamatoria, por ejemplo, en la rozadura de una rodilla, bloquea la infección, los macrófagos liberan moléculas que facilitan la curación. Un proceso igual de "curación"

El autor

PETER LIBBY, formado en la Universidad de California en San Diego, dirige el servicio de medicina cardiovascular del Hospital Brigham and Women, de Boston.

Resumen/*Aterosclerosis*

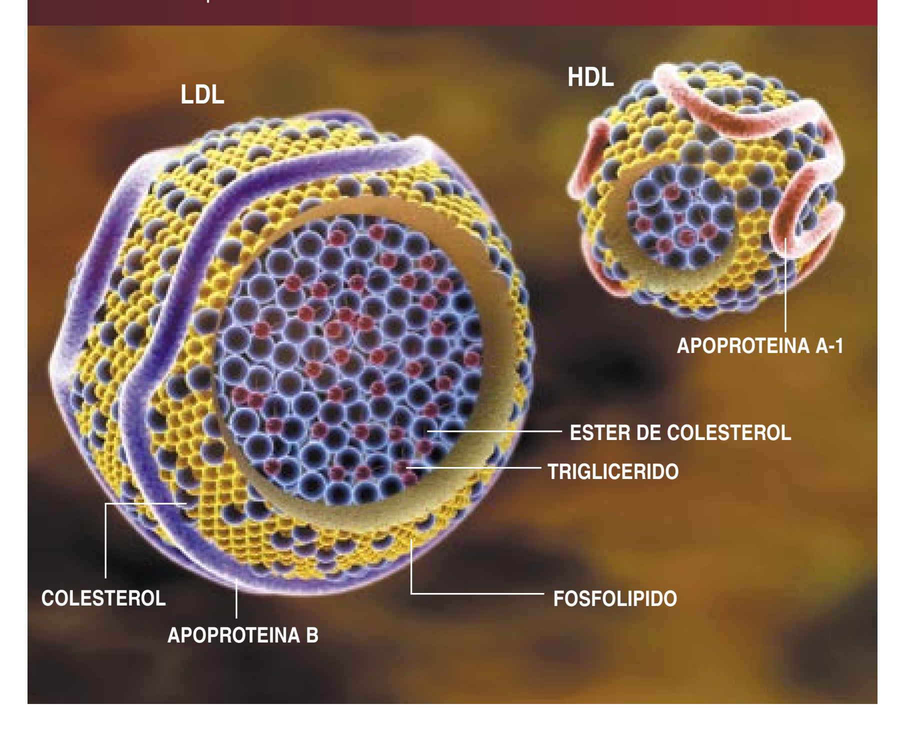
- La inflamación fomenta la aparición y desarrollo de la aterosclerosis, condición que consiste en la acumulación peligrosa de placas lipídicas en las arterias. Debe desecharse la vieja tesis según la cual la grasa se deposita de forma pasiva en las paredes arteriales.
- La inflamación puede provocar la rotura de ciertas placas. Los coágulos de sangre, que tienden a formarse sobre placas rotas, ocluyen así las arterias y facilitan el camino al infarto o al accidente cerebrovascular.
- Un exceso de la lipoproteína de baja densidad (LDL), o "colesterol malo", en la sangre puede desencadenar la inflamación arterial. Y, reducirla, las terapias encaminadas a bajar el colesterol, piezas clave en el tratamiento de la aterosclerosis. Se hallan en fase de estudio otras estrategias dirigidas también contra la inflamación.
- Podría resultar asimismo útil un análisis de sangre que detectara un proceso inflamatorio, método que se sumaría a las técnicas de determinación del colesterol que los clínicos emplean para valorar el riesgo de infarto o de accidente cerebrovascular.

FUNCIONES DE LAS LIPOPROTEINAS

En la idea común en torno a la aterosclerosis se asigna con razón el papel de "malo" a la lipoproteína de baja densidad (LDL) y el de "bueno" a la lipoproteína de alta densidad (HDL). Sin embargo, estas partículas (*se muestran en los cortes transversales*) cumplen su respectiva función de una forma hasta hace poco insospechada.

Las lipoproteínas transportan el colesterol por la sangre. Las LDL lo cargan en el hígado e intestinos para acarrearlo hasta diversos tejidos, que lo utilizan para reparar membranas o producir esteroides. Las HDL transportan el colesterol al hígado para su excreción o reciclaje. De acuerdo con la vieja interpretación del desarrollo de la aterosclerosis, el exceso de LDL promovía la condición al acumularse *sobre* las paredes de los vasos. La investigación reciente ha demostrado, sin embargo, que se acumula *en el interior* de las paredes de los vasos, donde sus componentes se oxidan y alteran; los componentes alterados instan entonces una respuesta inflamatoria que progresiva y peligrosamente modifica las arterias.

Suelen los clínicos atribuir los efectos protectores de las HDL a su capacidad de captación de colesterol de las arterias. Y es verdad que así operan las HDL, aunque nuevos hallazgos indican que también combaten la aterosclerosis al interponerse en la oxidación de las LDL.



MEDICINE HORSE *Hybrid Medical Animation*

acompaña también a la inflamación limitada, aunque crónica, que opera en la aterosclerosis. En vez de devolver las paredes arteriales a su estado original, el proceso remodela perversamente la pared —cambia su carácter— y acaba generando una placa mayor y más compleja.

En estos últimos años los biólogos han descubierto que los macrófagos, las células endoteliales y las células musculares lisas de la íntima inflamada segregan factores que incitan a las células musculares lisas de la media (el tejido situado debajo de la íntima) a emigrar y colocarse encima de la íntima, replicarse y sintetizar componentes de la matriz extracelular. Las células y las moléculas de la matriz se unen y forman una capa fibrosa de tejido conectivo rico en colágeno y en células musculares lisas. A medida que crece dicho revestimiento, se va modificando la zona subyacente: muere una parte de las células espumosas con la consiguiente liberación de lípidos. Por esta razón los anatomopatólogos denominan núcleo lipídico o necrótico a dicha región subyacente.

Durante una fracción importante de su existencia, las placas de ateroma se expanden hacia el exterior, en vez de hacerlo hacia la luz de los vasos sanguíneos, lo que permite un flujo sanguíneo normal. Cuando las placas presionan hacia adentro, restringen el canal sanguíneo y dan lugar a un fenómeno de estenosis. La estenosis impide la aportación de sangre a los tejidos. En un ejercicio físico o en situaciones de estrés, la arteria cardíaca dañada puede resentirse y mostrarse incapaz de aportar la sangre necesaria: se produce una angina de pecho, evidenciada por una sensación de angustia, de presión sobre la caja torácica. El estrechamiento de otras arterias puede provocar calambres dolorosos en las pantorrillas o las nalgas durante un esfuerzo, síntomas que se conocen como claudicación intermitente.

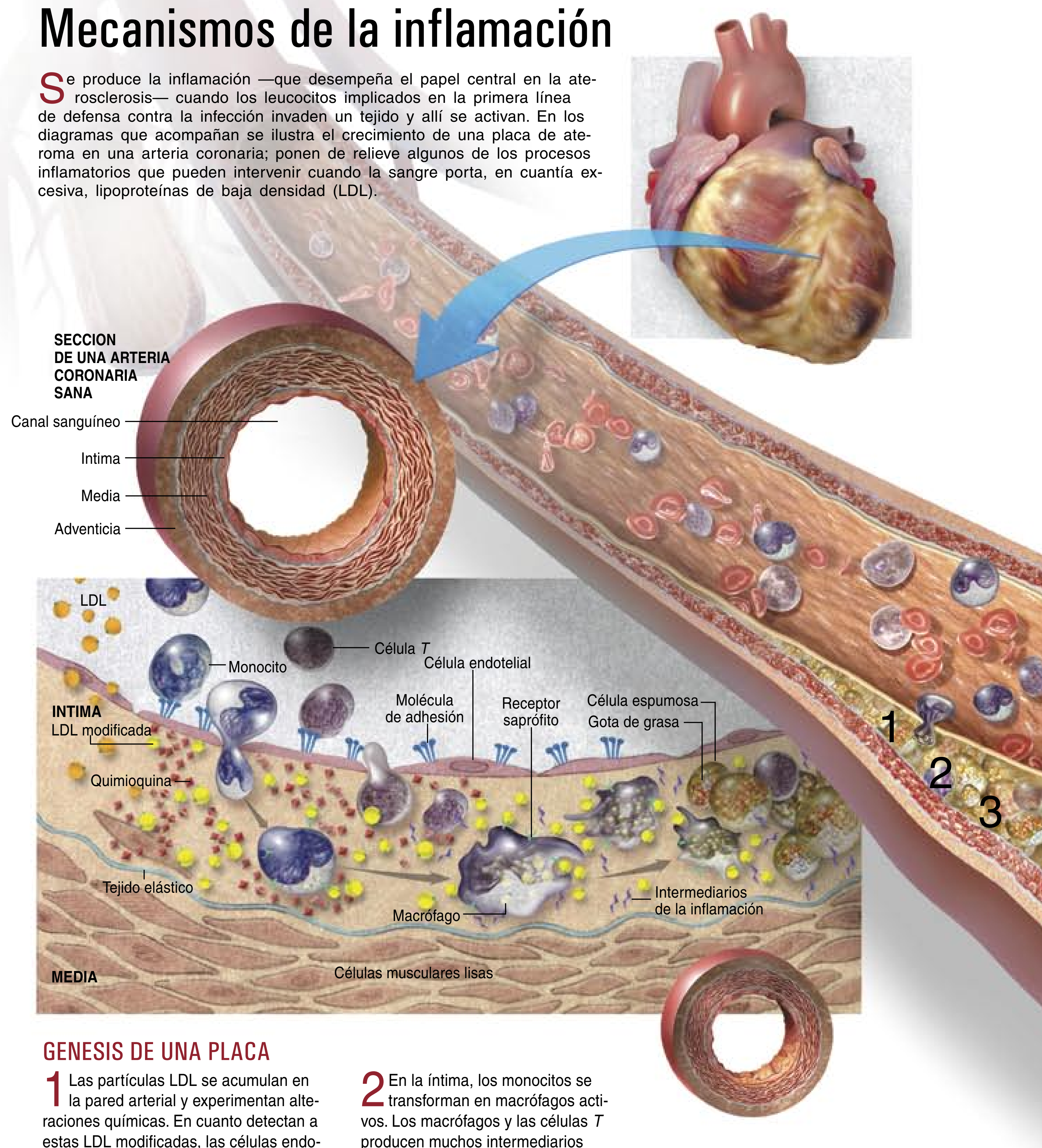
Así se inicia una crisis

A veces una placa alcanza un tamaño tal, que detiene el flujo sanguíneo en una arteria y genera un infarto o un accidente cerebrovascular. Sin embargo, sólo un 15 por ciento de los infartos suceden de esta manera. Cuando examinan con atención las paredes de los vasos sanguíneos de personas que han muerto por un ataque al corazón, los anatomopatólogos demuestran que la mayoría de los infartos ocurren después de la rotura del revestimiento fibroso de una placa, formándose un coágulo en la abertura. Las placas más propensas a la rotura son las que poseen un revestimiento fino y contienen una acumulación grande de lípidos y muchos macrófagos; como en las etapas tempranas de la aterosclerosis, su vulnerabilidad deriva de la inflamación.

La integridad del revestimiento fibroso depende de las fibras de colágeno, muy resistente, fabricadas por células musculares lisas. Cuando se origina una inflamación en una placa tranquila, los mediadores del sistema inmunitario deterioran el revestimiento. Mi laboratorio ha demostrado que esos mediadores de la inflamación pueden estimular la secreción, por macrófagos, de enzimas que degradan el colágeno e inhibir, además, la síntesis, por las células muscu-

Mecanismos de la inflamación

Se produce la inflamación —que desempeña el papel central en la aterosclerosis— cuando los leucocitos implicados en la primera línea de defensa contra la infección invaden un tejido y allí se activan. En los diagramas que acompañan se ilustra el crecimiento de una placa de ateroma en una arteria coronaria; ponen de relieve algunos de los procesos inflamatorios que pueden intervenir cuando la sangre porta, en cuantía excesiva, lipoproteínas de baja densidad (LDL).



GENESIS DE UNA PLACA

1 Las partículas LDL se acumulan en la pared arterial y experimentan alteraciones químicas. En cuanto detectan a estas LDL modificadas, las células endoteliales segregan moléculas de adhesión, que se unen a monocitos (representantes centrales en la inflamación) y a células *T* (pertenecientes también al sistema inmunitario) de la sangre. Las células endoteliales segregan, asimismo, "quimioquinas", substancias que atraen a las células captadas hacia el interior de la íntima.

2 En la íntima, los monocitos se transforman en macrófagos activos. Los macrófagos y las células *T* producen muchos intermediarios de la inflamación, incluidas las citoquinas (transmisoras de señales entre las células del sistema inmunitario) y factores que promueven la división celular. Los macrófagos despliegan también, en su superficie, receptores saprófitos, que facilitan la absorción de LDL modificadas.

3 Con la ingestión de LDL los macrófagos quedan ahítos de gotas de grasa. Estos macrófagos de aspecto espumoso, saturados de grasa (llamados también células espumosas) y las células *T* forman una suerte de película grasa, precursora de una placa aterosclerótica.



PROGRESION DE LA PLACA

4 Las moléculas de la inflamación pueden promover un crecimiento ulterior de la placa y la formación de una cubierta fibrosa sobre el núcleo lipídico. Este revestimiento se desarrolla cuando las moléculas instan a las células musculares lisas de la media para que emigren hacia la parte superior de la íntima, se multipliquen y produzcan una matriz fibrosa, tenaz, que aglutina a las células. El revestimiento incrementa el tamaño de la placa al tiempo que la aísla de la sangre.

ROTURA DE LA PLACA

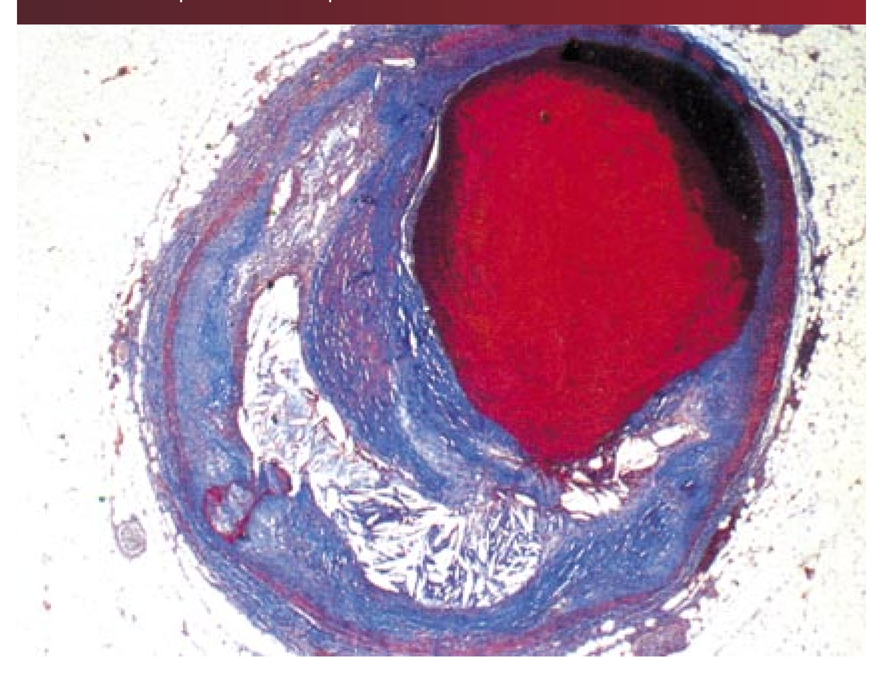
5 Llegados aquí, las sustancias inflamatorias segregadas por las células espumosas debilitan el revestimiento mediante la digestión de moléculas de la matriz y lesión de células musculares lisas, que se tornan así incapaces de reparar la cubierta. Mientras tanto, las células espumosas producen factor tisular, un promotor de coágulos muy potente. Si la placa debilitada se rompe, el factor tisular interaccionará con los elementos promotores de coágulos de la sangre y se originará un trombo. Si el coágulo formado alcanza cierto tamaño, terminará por obstruir el flujo de sangre al corazón, produciendo un infarto, vale decir, la muerte del tejido cardíaco.

CORTE TRANSVERSAL DE UNA ARTERIA AFECTADA POR ATEROSCLEROSIS

KEITH KASNOT

UNA VISTA INTERIOR

El coágulo sanguíneo, o trombo (*rojo*), que aparece en esta micrografía se ha formado en una placa de ateroma de una arteria coronaria y ha ocluido el vaso. Algunos coágulos se disuelven antes de que causen un infarto o un accidente cerebrovascular, aunque pueden crear otros problemas al avivar la expansión de la placa.



M. J. DAVIES/OXFORD UNIVERSITY PRESS/HARVEY MILLER PUBLISHERS

lares lisas, del colágeno indispensable para el sostén y reparación del revestimiento.

Se forman coágulos cuando la sangre se infiltra en una fisura del revestimiento y encuentra un núcleo lipídico repleto de proteínas capaz de facilitar la coagulación. Por ejemplo, las moléculas de las células *T* de las placas estimulan a las células espumosas para que sinteticen grandes cantidades de factor tisular, un potente inductor de coágulos. La propia sangre circulante contiene precursores de las proteínas implicadas en la cascada de reacciones responsables de la coagulación. Cuando la sangre se encuentra con el factor tisular y otros promotores de la coagulación en el núcleo de una placa, se activan los precursores de la coagulación. Nuestro organismo produce sustancias que impiden la constitución de un coágulo o que lo degraden antes de que provoque un infarto o un accidente cerebrovascular, pero las placas donde se instala una inflamación liberan moléculas que bloquean el mecanismo natural de destrucción de coágulos.

Si se elimina un coágulo, por vía natural o con el auxilio de un fármaco, se reemprende el proceso de curación, restaurándose el revestimiento pero agrandando también el tamaño de la placa por formación de tejido cicatricial. Según parece, las placas crecen a trompicones, al hilo de las fases de inflamación y a medida que los coágulos emergen y se disuelven, dejando cada vez nuevas cicatrices.

Con la nueva interpretación del mecanismo de la aterosclerosis entendemos por qué muchos infartos sobrevienen sin signos anunciadores: las placas que se rompen no ciegan la luz del vaso, ni provocan angina de pecho, ni se manifiestan en las imágenes de los vasos. Recibe asimismo explicación por qué las terapias de dilatación arterial (angioplastia o inserción de dilatadores metálicos) o de derivación quirúrgica no logran conjurar el peligro de un infarto futuro. En esos casos el peligro puede acechar en otra parte, donde una placa estrecha menos el diámetro de una arteria pero se halla a punto de romperse. Por desgracia, incluso cuando la estenosis es el problema, las arterias tratadas se reocluyen a menudo, tal vez debido a que las intervenciones estimulan reacciones de inflamación.

Más allá del colesterol malo

Aunque las partículas de LDL desencadenan la secuencia de acontecimientos descritos, se han identificado otros factores que incrementan el riesgo de aterosclerosis o sus complicaciones. Varios de esos factores de riesgo, y algunos más que se estudian en la actualidad, presentan curiosas propiedades inflamatorias.

Numerosos estudios estadísticos confirman que la mitad de los pacientes que sufren una angina de pecho o han tenido un infarto no presentan concentraciones de LDL en sangre por encima de los valores medios. Ese dato de observación indicaba, se interpretaba, que no había una vinculación en tales pacientes entre LDL y aterosclerosis. Sin embargo, los niveles medios de LDL en la sociedad occidental exceden mucho las necesidades del organismo y pueden realmente deteriorar las arterias.

A medida que han ido comprobando que la concentración de LDL en sangre se correlaciona con la salud del sistema vascular, los expertos en salud pública han depurado de manera progresiva la definición de niveles "saludables" de lipoproteínas. Hoy, en los Estados Unidos, se admite que la concentración "óptima" de LDL-colesterol se encuentra por debajo de los 100 miligramos por decilitro de sangre (mg/dl). Se aconseja administrar medicamentos a las personas con riesgo cuando se detecta una concentración de 130 mg/dl en vez de los acostumbrados 160. Para adultos con un riesgo relativamente bajo de cardiopatías, se recomienda iniciar un "cambio de estilo de vida" —dieta y ejercicio— ya a los 160 mg/dl y establecer una terapia farmacológica a los 190 mg/dl.

Por lo que se refiere a las conexiones entre la inflamación y las LDL, se han recabado ya algunos

resultados de interés. La diabetes, por ejemplo, eleva los niveles de glucosa en la sangre; este azúcar puede elevar la glicosilación, y con ello las propiedades inflamatorias, de la LDL. El tabaco entraña la formación de oxidantes y acelera quizá la oxidación de los constituyentes de las LDL, favoreciendo por tanto la inflamación arterial incluso en individuos con unos niveles de LDL normales. La obesidad predispone a la diabetes y a la inflamación vascular. Una presión sanguínea elevada puede no tener efectos inflamatorios directos, pero una hormona parcialmente responsable en muchos casos de hipertensión humana —la angiotensina II— ejerce una función inflamatoria; con niveles elevados de angiotensina II se verían favorecidas la hipertensión y la aterosclerosis a un tiempo.

Por el contrario, las lipoproteínas de alta densidad (HDL) cumplen una misión beneficiosa, al parecer. Conforme descienden los niveles de este "colesterol bueno", aumenta la probabilidad de sufrir un infarto. Por consiguiente, para afinar las estimaciones de riesgo cardiovascular, muchos clínicos miden no sólo los niveles de LDL en sangre sino también el nivel de HDL, así como la razón entre ambos. Las HDL consiguen, cabe pensar, sus efectos beneficiosos al reducir la inflamación: transportan enzimas antioxidantes capaces de degradar los lípidos oxidados.

Puesto que los mecanismos de la inflamación bloquean y eliminan los agentes infecciosos, los biólogos han abordado la posible intervención de las infecciones arteriales en la inflamación de las arterias. De acuerdo con la investigación reciente, la aterosclerosis puede desarrollarse en ausencia de infección, pero se ha demostrado también que los virus del herpes o la bacteria *Chlamydia pneumoniae* (una causa frecuente de infecciones respiratorias) pueden inducir o agravar en ocasiones la aterosclerosis. Y así, *C. pneumoniae* aparece en muchas placas de ateroma; estimula las reacciones inflamatorias de los macrófagos, de las células endoteliales vasculares y de las células musculares lisas.

Las infecciones podrían actuar también a distancia, en lo que yo he llamado un efecto eco. Cuando el organismo lucha contra las infecciones, los mediadores de la inflamación pueden trasladarse, vehiculados por la sangre, hasta puntos remotos. Estas sustancias pueden, en teoría, estimular los leucocitos de las placas de ateroma, promoviendo, por tanto, el crecimiento o la rotura de la placa. En la actualidad están en marcha pruebas clínicas para comprobar si con tandas limitadas de antibióticos se previene la recaída de un infarto; un primer resultado obtenido ya parece indicar que no lo consiguen.

Una reducción del peligro

Dado el papel crucial que la inflamación desempeña en la aterosclerosis, ¿se frena la patología con medicinas antiinflamatorias? Algunas se emplean ya, como la aspirina; otras se encuentran en fase de estudio. La aspirina pertenece al tipo de fármacos NSAID (fármacos antiinflamatorios no esteroideos), un grupo en el que también se incluyen los analgésicos ibuprofen y naproxen. Lo mismo que otros NSAID, la aspirina impide la formación de ciertos mediadores lipídicos de la inflamación, de las prostaglandinas en particular, que causan dolor y fiebre. Datos fiables obtenidos en pruebas clínicas rigurosas indican que la aspirina protege contra el infarto y, en algunos pacientes, contra pequeños accidentes cerebrovasculares, los ataques isquémicos transitorios (TIA). Ahora bien, considerando que las dosis eficaces son muy débiles, la acción de la aspirina se deja sentir en la reducción de la eficacia de los factores de coagulación más que en la inhibición de los mecanismos inflamatorios.

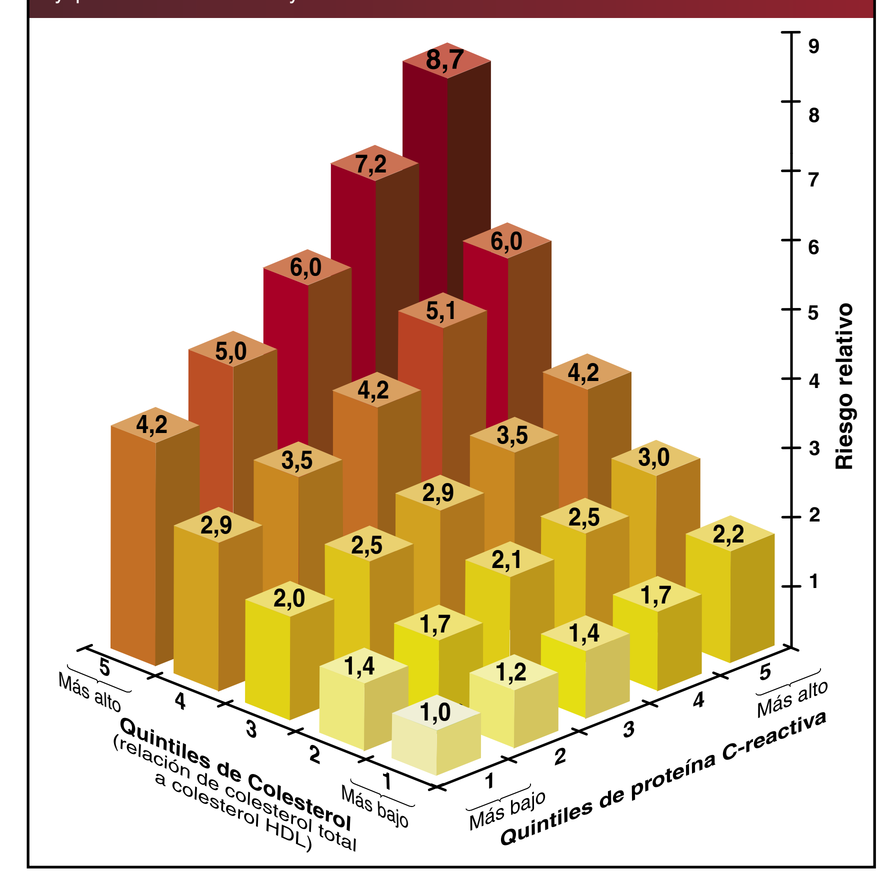
Escasean los datos clínicos relativos a los efectos de otros NSAID sobre la aterosclerosis; en algunos casos sugieren que los inhibidores selectivos de la enzima COX-2 productora de prostaglandina podrían promover el desarrollo de un trombo en algunos pacientes. La cortisona y esteroides relacionados podrían resultar demasiado tóxicos para un uso prolongado; ninguna observa-

UNA PRUEBA REVELADORA

Para decidir si un paciente requiere tratamiento preventivo de un infarto relacionado con la aterosclerosis, suele recurrirse a la prueba analítica de la concentración de colesterol en sangre. Pero este enfoque pasa por alto a un número de individuos vulnerables muy notable. Varios estudios sugieren que el análisis de la concentración sanguínea de proteína C-reactiva —un marcador de inflamación— podría añadir una información valiosa. En un informe reciente, Paul M. Ridker, del Hospital Brigham and Women, pone de manifiesto que el examen conjunto de los niveles de proteína C-reactiva (que no puede predecirse sólo con los datos del colesterol) y los niveles de colesterol proporciona una indicación del riesgo más precisa que una valoración exclusiva del colesterol (*gráfico*).

Ridker ordenó los niveles de colesterol en la población general adulta en cinco grupos crecientes (quintiles) y, separadamente, dividió también los valores de proteína C-reactiva en quintiles. Determinó luego el riesgo relativo de quienes presentaban combinaciones diferentes de colesterol y valores de proteína C-reactiva. Es decir, asignó un valor de peligro de "uno" a aquellos individuos cuyos valores de colesterol y proteína C-reactiva se encontraban en el quintil más bajo (*esquina frontal*) y calculó por cuánto se multiplicaba el riesgo en los adultos que mostraban otras permutaciones de niveles de colesterol y proteína C-reactiva.

Observó lo siguiente: los valores altos de proteína C-reactiva denotaban un riesgo elevado de infarto o accidente cerebrovascular, incluso en individuos con valores de colesterol tranquilizantes. Por ejemplo, personas con valores medios de colesterol (tercer quintil) y los niveles más elevados de proteína C-reactiva se encuentran en un peligro parecido al de aquellas que tienen el colesterol más alto y los niveles más bajos de proteína C-reactiva. Los individuos portadores de valores muy altos tanto de colesterol como de proteína C-reactiva se enfrentan a un riesgo superior al de los demás. Animados con estos resultados, los investigadores esperan ahora abordar un estudio amplio que valore si los tratamientos basados en decisiones fundadas en esas determinaciones conjuntas de colesterol y proteína C-reactiva ayudarán a salvar más vidas.



ción avala su utilidad en la reducción de las complicaciones de la aterosclerosis.

Aun cuando quedara evidenciada la eficacia de los fármacos antiinflamatorios, tendrían que administrarse durante años para mantener el control de la aterosclerosis. Pero semejante inhibición permanente de los mecanismos de inflamación iría acompañada de un mayor riesgo de infecciones. Será preciso dar con un medio capaz de bloquear la inflamación crónica sin socavar el conjunto del sistema inmunitario. Una estrategia más realista habría de concentrarse en la desactivación radical de los factores de la inflamación arterial.

Hay ya algunas soluciones accesibles. Una dieta saludable para el corazón, ejercicio regular y, para los individuos obesos, pérdida de peso pueden mitigar el riesgo de infarto y diabetes. Además, desde 1994 varias pruebas clínicas han establecido que los fármacos que rebajan el nivel de lípidos limitan las complicaciones asociadas a aterosclerosis y prolongan la vida. No se comprende todavía el mecanismo de acción de los fármacos que hacen descender el nivel lipídico, que no parecen reducir la estenosis arterial sustancialmente; quizá la caída de concentración de lípidos amortigua la inflamación, con la consiguiente imposibilidad de formación de placas y, por ende, de los riesgos que acompañan a su rotura.

De ese proceder se ocuparían las estatinas (ampliamente prescritas como fármacos controladores del nivel lipídico en sangre). Las estatinas inhiben los mecanismos de la inflamación en los pacientes. Los efectos de los fármacos antiinflamatorios quizá no dependan por completo del cambio de la concentración de lípidos en la sangre. Las estatinas —que disminuyen los niveles de LDL y lípidos dañinos afines al aumentar su degradación en el organismo— limitan también la disponibilidad de los intermediarios que capacitan a las células para responder a los mediadores de la inflamación.

Los fármacos experimentales dirigidos contra otros factores de riesgo de infarto y accidente cerebrovascular podrían ejercer también

NINA FINKEL; FUENTE: "HIGH-SENSITIVITY C-REACTIVE PROTEIN: POTENTIAL ADJUNCT FOR GLOBAL RISK ASSESSMENT IN THE PRIMARY PREVENTION OF CARDIOVASCULAR DISEASE," DE PAUL M. RIDKER EN *CIRCULATION*, VOL. 103, PAGS. 1813–1818; 3 DE ABRIL DE 2001

efectos antiinflamatorios útiles. Nos vienen a la mente los agentes que elevan los niveles de HDL o limitan la acción de la angiotensina II. Se ha mostrado, empero, decepcionante el tratamiento con vitaminas antioxidantes.

Aun cuando no se disponga de un tratamiento ideal, la mortalidad y las complicaciones asociadas a la aterosclerosis disminuirían mucho si se mejorase la detección precoz de futuras víctimas cuya concentración lipídica nos parece demasiado normal para incoar un tratamiento. Los hallazgos recientes sugieren que los análisis de sangre que incluyen pruebas lipídicas y determinación de la proteína C-reactiva podrían facilitar dicha detección.

Hacia una detección precoz

La presencia de la proteína C-reactiva en la sangre denuncia un proceso de inflamación de algún punto del organismo; niveles muy elevados, aun cuando los valores de LDL sean normales, indican que ha aumentado el riesgo de sufrir un infarto o un accidente cerebrovascular. Y lo que reviste alcance mayor: en un estudio reciente la administración de estatinas a gente con concentraciones de LDL por debajo de la media pero con niveles altos de proteína C-reactiva redujo la incidencia de infarto con respecto a un grupo control sin tratamiento. Estos resultados deberán confirmarse.

Se están ensayando métodos no invasivos para la identificación específica de placas vulnerables; por ejemplo, la medición del calor de los vasos sanguíneos (la inflamación va acompañada de liberación de calor). Se intenta adaptar las técnicas de resonancia magnética o tomografía computarizada, para mejorar su capacidad de representar el material del interior de las paredes de los vasos. Los genéticos, por su lado, buscan variantes génicas que revelen proclividad a la inflamación crónica y a la aterosclerosis.

En el curso de la evolución, los mecanismos de la inflamación han ayudado al hombre a luchar contra las infecciones: sus ventajas superan los inconvenientes que de ella derivan. Hoy, como vivimos más tiempo, hacemos menos ejercicio, comemos en exceso y fumamos, comenzamos a sufrir el reverso de la inflamación, el de su capacidad de contribuir a la aterosclerosis y otras patologías crónicas. La ciencia continúa buscando una comprensión más profunda del papel desempeñado por la inflamación en la aterosclerosis y se pregunta por la naturaleza de esas perversas y complicadas interacciones que desencadenan y mantienen los procesos inflamatorios en las arterias. Los resultados cosechados habrán de abrir nuevas vías contra esta enfermedad de creciente importancia en el mundo entero, que causa amplias discapacidades y se cobra un número elevado de vidas.

Bibliografía complementaria

THE MOLECULAR BASES OF ACUTE CORONARY SYNDROMES. Peter Libby en *Circulation*, vol. 91, n.º 11, págs. 2844-2850; 1 de junio de 1995.

STABILITY AND INSTABILITY: THE TWO FACES OF CORONARY ATHEROSCLEROSIS. Paul Dudley White Lecture, 1995. M. J. Davies en *Circulation*, vol. 94, n.º 8, págs. 2013-2020; 15 de octubre de 1996.

OXIDIZED LIPIDS IN ATHEROGENESIS. FORMATION, DESTRUCTION AND ACTION. J. Berliner y cols. en *Thrombosis and Haemostasis*, vol. 78, n.º 1, págs. 195-199, julio de 1997.

LOW DENSITY LIPOPROTEIN OXIDATION AND ITS PATHOBIOLOGICAL SIGNIFICANCE. Daniel Steinberg en *Journal of Biological Chemistry*, vol. 272, n.º 34, págs. 20.963-20.966; 22 de agosto de 1997.

CURRENT CONCEPTS OF THE PATHOGENESIS OF THE ACUTE CORONARY SYNDROMES. Peter Libby en *Circulation*, vol. 104, n.º 3, págs. 366-372; 17 de julio de 2001.

THE VASCULAR BIOLOGY OF ATHEROSCLEROSIS. Peter Libby en *Heart Disease: A Textbook of Cardiovascular Medicine*. Sexta edición. Dirigida por Eugene Braunwald, Douglas P. Zipes y Peter Libby. W. Saunders, 2001.

INFLAMMATION AND ATHEROSCLEROSIS. Peter Libby, Paul M. Ridker y Attilio Maseri en *Circulation*, vol. 105, n.º 9, págs. 1135-1143; 5 de marzo de 2002.



Los mamíferos que conquistaron el mar

Kate Wong

KAREN CARR

1. **UN CETACEO PRIMITIVO, *Rodhocetus* (*derecha e izquierda, en primer término*), se da un festín con el abundante alimento del mar, mientras que *Ambulocetus* (*en segundo término*) ataca a un mamífero terrestre. Ocurría esta escena hace unos 48 millones de años, en lo que en la actualidad es Pakistán.**

El desenterramiento de nuevos fósiles y el análisis de ADN sacan a la luz la sorprendente historia evolutiva de los cetáceos

Remontémonos 48 millones de años atrás. Amanece sobre el mar de Tetis. El agua verdeazulada centellea con la primera luz del día. Para un pequeño mamífero, sin embargo, la jornada terminará muy pronto. *Eotitanops*, un animal parecido a un tapir, se ha acercado peligrosamente a la orilla del agua, ignorando la llamada de aviso de su madre. Inmóvil entre los manglares, el depredador acecha. Se abalanza hacia la orilla, propulsado por sus poderosos miembros posteriores, e hinca sus formidables dientes en la cría díscola, al tiempo que la arrastra hacia el agua. El forcejeo frenético de la víctima se debilita a medida que se ahoga, atrapada entre las mandíbulas de su captor, tenaces como una prensa. Victoriosa, la bestia se arrastra torpemente fuera del agua para devorar a su presa en tierra firme. A primera vista, el depredador recuerda a un fiero cocodrilo, con sus patas rollizas, cola robusta, largo hocico y ojos alojados en la parte alta del cráneo. Pero una inspección más detenida revela que no tiene armadura, sino pelo; en vez de garras, pezuñas. Las cúspides de sus dientes confirman que se trata de un mamífero, no de un reptil. En realidad, este animal improbable es *Ambulocetus*, un cetáceo primitivo, un eslabón en la serie de intermedios que vinculan a los antepasados terrestres de los Cetáceos con las 80 especies, aproximadamente, de ballenas, delfines y marsopas que en la actualidad señorean los océanos.

Hasta hace poco, la aparición de los Cetáceos constituía uno de los misterios más insondables para los biólogos dedicados al estudio de la evolución. Carentes de pelo y de extremidades posteriores e incapaces de ir a tierra para obtener siquiera un sorbo de agua dulce, los cetáceos actuales representan una notable desviación de la norma mamiferiana. Por su aspecto pisciforme, durante siglos se creyó que eran peces. Todavía en 1851 Herman Melville describía a Moby Dick y a los restantes cetáceos como tales. Mas para los naturalistas del siglo XIX como Charles Darwin, estos animales que respiran aire, tienen sangre caliente y alimentan a sus crías con leche pertenecían a los mamíferos. Y puesto que los mamíferos ancestrales vivían en tierra, estaba claro que los cetáceos descendían en último término de un antepasado terrestre. Sin embargo, la manera exacta en que ello se había producido escapaba a los estudiosos. Por su parte, Darwin señaló en *El origen de las especies* que un oso que nadaba con la boca abierta para capturar insectos era un punto de partida evolutivo plausible para los cetáceos. Semejante idea se recibió con sarcasmo, hasta el punto de que, en ediciones posteriores del libro, Darwin sólo indicaba que un tal oso era “casi como una ballena”.

El registro fósil de los Cetáceos no coadyuvó al avance del estudio de sus orígenes. De los pocos restos conocidos, ninguno era lo suficientemente completo o primitivo para aportar mucha luz al tema. Y los análisis que siguieron de la extraña anatomía de los cetáceos actuales apenas lograron dar un paso adelante. Un siglo después de Darwin, estos mamíferos acuáticos continuaban siendo un enigma. En 1945 George Gaylord Simpson, uno de los prohombres de la paleontología, indicaba, en su clasificación de los mamíferos, que los Cetáceos habían evolucionado durante tanto tiempo en los océanos, que no quedaba nada que sirviera para aclarar su origen terrestre. Considerándolos, “en su conjunto, los mamíferos más peculiares y aberrantes”, insertó los Cetáceos de manera arbitraria entre los demás órdenes. El lugar que los Cetáceos ocupaban en el árbol genealógico de los Mamíferos y la manera como se hicieron a la mar eran temas que se resistían a la explicación.

Sin embargo, a lo largo de los últimos 20 años, muchas de las piezas de este rompecabezas desconcertante han empezado a encajar en su sitio. Se ha descubierto un filón de huesos de cetáceos que corresponden al Eoceno, la época transcurrida entre hace 55 y 34 millones de años, cuando los cetáceos primitivos, o Arqueocetos, efectuaron su transición de la tierra al mar. Asimismo, han aparecido algunas pistas del Oligoceno, la época siguiente, en la que surgieron los subórdenes modernos de Cetáceos: los Misticetos o Mistacocetos (las ballenas) y los Odontocetos (cetáceos con dientes). Con dicho material fósil y los análisis del ADN procedente de animales vivos, la ciencia bosqueja un panorama detallado de cuándo, dónde y cómo evolucionaron los Cetáceos a partir de sus antepasados terrestres. De ese cuadro se desprende una de las transformaciones más profundas de la que tengamos noticia.

Evolución de las ideas

Por las fechas en que Simpson declaraba que las relaciones de los Cetáceos con los demás mamíferos no podían descifrarse con los datos de la anatomía, apareció un nuevo enfoque, de corte comparativo, que se basaba en las reacciones antígeno-anticuerpo observadas en animales vivos. Alan Boyden, de la Universidad de Rutgers, y un colaborador suyo aplicaron la técnica a la cuestión de los Cetáceos. Sus resultados demostraban que, entre los animales actuales, los Cetáceos guardaban un estrecho parentesco con los Artiodáctilos, mamíferos ungulados de dedos pares; a ese grupo pertenecen, entre otros, camellos, hipopótamos, cerdos y bóvidos. Pero la naturaleza exacta de tal parentesco seguía siendo confusa. ¿Eran artiodáctilos los propios Cetáceos? ¿O acaso ocupaban una rama propia en el árbol genealógico de los Mamíferos, unida a la rama de los Artiodáctilos a través de un antepasado común?

Las pruebas que abonaban la segunda posibilidad —la de un ancestro compartido, aunque con ramas distintas— llegaron en los años sesenta. Se obtuvieron en la investigación sobre los Condilartros, mamíferos ungulados primitivos que no habían adquirido todavía las características de los Artiodáctilos o de los demás órdenes de mamíferos desarrolladas en el curso de la evolución. Leigh Van Valen, entonces en el neoyorquino Museo Americano de Historia Natural, descubrió semejanzas sorprendentes entre los dientes tricúspides de los pocos fósiles conocidos de cetáceos y los de los Mesoníquidos, un grupo de condilartros carnívoros. Asimismo, encontró características dentales compartidas por Artiodáctilos y Arctociónidos, otro grupo de condilartros emparentado con los Mesoníquidos. Van Valen concluyó de ello que los Cetáceos descendían de los Mesoníquidos, carnívoros y parecidos a lobos; estaban, pues, relacionados con los Artiodáctilos a través de los Condilartros.

Ballenas andantes

Pasó un decenio, aproximadamente, antes de que se desenterraran fósiles cuya edad se acercara tanto al punto de ramificación evolutiva de los Cetáceos, que pudiera someterse a contrastación la hipótesis de los Mesoníquidos avanzada por Van Valen. Pero no se comprendió de inmediato el significado encerrado en esos especímenes. Todo empezó cuando Philip Gingerich, paleontólogo de la Universidad de Michigan, se trasladó al Pakistán en 1977 en busca de mamíferos terrestres del Eoceno; se decía que cierta región del país albergaba un yacimiento. Los trabajos de campo resultaron frustrantes: sólo aparecían fósiles marinos. Que hubiera trazas de vida marina primitiva en Pakistán, lejos de la costa actual del país, no le sorprendía. Durante el Eoceno, el mar de Tetis cubrió periódicamente grandes extensiones de lo que ahora es

Resumen/*Vocabulario*

CETACEOS es el orden de mamíferos que comprende las ballenas, cachalotes, delfines y marsopas actuales, con sus antepasados extinguidos, los Arqueocetos. Los miembros vivientes del grupo pertenecen a dos subórdenes: los Odontocetos y los Misticetos o Mistacocetos. Los Odontocetos, cetáceos con dientes, comprenden los cachalotes, orcas, calderones, belugas y todos los delfines y marsopas; los Misticetos, cetáceos con ballenas o barbas, incluyen ballenas y rorcuales.

MESONIQUIDOS es un grupo de mamíferos primitivos, con pezuñas y aspecto de lobo. Creíase que habían dado origen a los Cetáceos.

ARTIODACTILOS es el orden de los mamíferos ungulados con un número par de dedos, entre los que se cuentan los camellos, los rumiantes como las vacas, los hipopótamos y, según se admite ahora, los cetáceos.

EOCENO es la época transcurrida entre 55 y 34 millones de años atrás. Durante la misma, los cetáceos primitivos hicieron su transición desde la tierra al mar.

OLIGOCENO es la época comprendida entre 34 y 24 millones de años atrás. En ese intervalo temporal los Odontocetos y los Misticetos evolucionaron a partir de sus antepasados arqueocetos.



Puede parecer extraño que 300 millones de años después de que los vertebrados lograran establecer una cabeza de playa en tierra, algunos volvieran al mar. No obstante, el entorno en el que evolucionaron los cetáceos primitivos ofrece algunos atisbos de qué fue lo que los atrajo de nuevo al océano. Durante gran parte del Eoceno (hace aproximadamente entre 55 y 34 millones de años), el mar de Tetis, así llamado en honor de una diosa de la mitología griega, se extendía desde España hasta Indonesia. Aunque los continentes y las placas oceánicas que ahora conocemos ya habían tomado forma, la India andaba todavía a la deriva, Australia no se había separado completamente de la Antártida y enormes extensiones de Africa y Eurasia se encontraban sumergidas bajo el Tetis. Estas aguas someras y cálidas incubaban abundantes nutrientes y bullían de vida. Además, el espacio que dejaron vacante los plesiosaurios, mosasaurios y otros grandes reptiles marinos que perecieron junto con los dinosaurios quedó libre para nuevos depredadores culminales (aunque tiburones y cocodrilos resultaban todavía temibles competidores). Es difícil imaginar una invitación más tentadora a la vida acuática para un mamífero.

Durante la época siguiente, el Oligoceno, descendió el nivel del mar. La India se acopló con el resto de Asia, formando la interfaz plegada del Himalaya. Y lo que reviste mayor interés, según señala Philip Gingerich, se separaron Australia y la Antártida, abriendo con ello el océano Austral y creando una corriente circumpolar austral que terminó por transformar la Tierra de clima suave del Eoceno en el planeta rematado por el hielo en el que hoy vivimos. Los modernos sistemas de corrientes y climático produjeron cambios radicales en la cantidad y la distribución de los nutrientes en el mar, generando así todo un nuevo conjunto de oportunidades ecológicas para los Cetáceos.

Tal como postula Ewan Fordyce, ello preparó el camino para la sustitución de los Arqueocetos por los Odontocetos y los Misticetos (cetáceos con dientes y con barbas, respectivamente). La conexión más antigua entre los Arqueocetos y los órdenes modernos de cetáceos la cifra Fordyce en *Llanocetus*, un protomisticeto de 34 millones de años de antigüedad, procedente de la Antártida, que bien pudiera haber recorrido las gélidas aguas antárticas a la captura de *krill*, ni más ni menos que lo que hacen las ballenas actuales. Los Odontocetos, que surgieron por la misma época, se especializaron para convertirse en ecolocalizadores que podían cazar en las profundidades.

Por desgracia, los fósiles que documentan los orígenes de los Misticetos y los Odontocetos escasean. Los niveles del mar bajos durante el Oligoceno medio expusieron a vientos y lluvias erosivos la mayoría de los sedimentos del Oligoceno temprano en los que podrían hallarse cetáceos; convirtieron este período en un “desierto de fósiles”, en expresión de Mark Uhen. Sin embargo, el registro fósil posterior muestra que al poco, hace unos 30 millones de años, Odontocetos y Misticetos se habían diversificado en muchas de las familias de cetáceos que en la actualidad dominan los océanos.

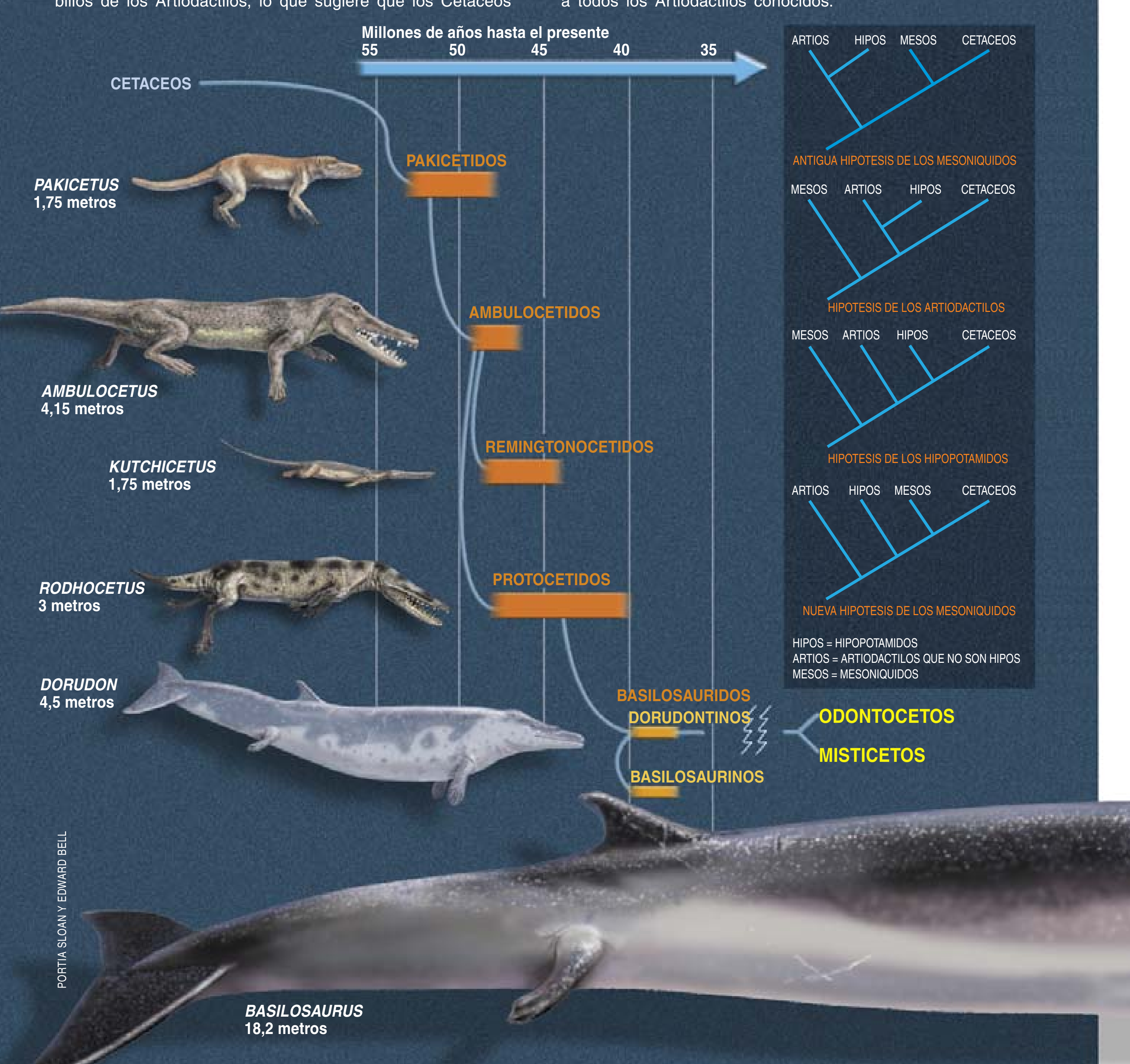


el subcontinente indio. Pero entre los restos antiguos de peces y caracoles se recuperaron dos fragmentos pélvicos que parecían corresponder a animales marchadores de cierta talla. “En broma las llamábamos ballenas andantes”, recuerda Gingerich. Por curiosos que fueran los fragmentos pélvicos, el único fósil recolectado durante aquella campaña que les pareció importante era la mandíbula de un artiodáctilo primitivo, hallado también en otra región del país.

Dos años después, en las estribaciones del Himalaya, al norte de Pakistán, el equipo de Gingerich encontró una nueva pista de cetáceos, harto extraña: un cráneo parcial de un animal del tamaño de un lobo, asociada a restos de mamíferos terrestres de 50 millones de años de antigüedad, que presentaba características distintivas de cetáceo. Todos los Cetáceos modernos muestran peculiaridades morfológicas en sus oídos que no aparecen en ningún otro vertebrado. Aunque el cráneo fósil carecía de la anatomía necesaria para oír direccionalmente en el agua (una facultad crucial para los cetáceos actuales), evidenciaba los rasgos óticos propios de los Cetáceos. El equipo había descubierto el cetáceo más antiguo y primitivo hasta entonces conocido, un animal que debió de pasar parte de su

CUATRO HIPOTESIS SOBRE EL PARENTESCO DE LOS CETACEOS

De los extinguidos Arqueocetos se originaron los dos subórdenes modernos de este grupo, los Odontocetos y los Misticetos. Se ilustran (*a la izquierda*) miembros representativos de cada familia o subfamilia de Arqueocetos. Los esquemas ramificados (*a la derecha*) perfilan distintas hipótesis de la relación de parentesco de los Cetáceos con otros mamíferos. La vieja hipótesis de los Mesoníquidos postulaba que los parientes más próximos de los Cetáceos eran los Mesoníquidos, animales extinguidos parecidos a lobos; esa propuesta resulta inviable a la luz de nuevos descubrimientos de cetáceos fósiles. Los huesos del tobillo de estos cetáceos primitivos presentan las características distintivas de los tobillos de los Artiodáctilos, lo que sugiere que los Cetáceos deben incluirse en dicho grupo, según defiende la hipótesis de los Artiodáctilos. Los estudios moleculares indican que los Cetáceos guardan con los hipopótamos un parentesco más estrecho que con ningún otro grupo de Artiodáctilos. Sin embargo, queda por ver si el registro fósil apoya la hipótesis de los Hipopotámidos. Una cuarta situación hipotética, que aquí se califica de nueva hipótesis de los Mesoníquidos, propone que estos mamíferos podrían seguir siendo los parientes más cercanos de los Cetáceos si se incluyeran asimismo en el orden Artiodáctilos, no en el extinguido orden de los Condilartros, su ubicación habitual. Si éste fuera el caso, habrían perdido los rasgos del tobillo que caracterizan a todos los Artiodáctilos conocidos.



tiempo, la mayor quizás, en tierra. Gingerich le puso el nombre de *Pakicetus*, por su lugar de origen. El hallazgo excitó la búsqueda de cetáceos primitivos.

Por entonces también, otro grupo encontró un fragmento de la mandíbula inferior y dientes sueltos de *Pakicetus*; las semejanzas dentales con los Mesoníquidos reforzaron la tesis de la vinculación. Puesto que *Pakicetus* aparecía hace alrededor de 50 millones de años y se conocían mesoníquidos de aproximadamente la misma época y de la misma parte del mundo, cobró fuerza la idea de que los Cetáceos descendieran de los Mesoníquidos o de animales estrechamente emparentados con éstos. Pese a todo, seguía envuelta en el misterio la morfología del tronco y las extremidades de los cetáceos más antiguos.

Las investigaciones paleontológicas en Pakistán se suspendieron con motivo de la invasión soviética de Afganistán. Hubo que considerar otros posibles yacimientos. Egipto, por ejemplo. En 1983, Gingerich viajó al valle de Zeuglodon en el desierto Occidental, así llamado por los informes de principios del siglo XX sobre fósiles de cetáceos primitivos (denominados entonces *Zeuglodon*) encontrados en la zona, a unos 150 kilómetros al sudoeste de El Cairo. Como Pakistán, gran parte de Egipto se hallaba antaño sumergida bajo el Tetis. Los esqueletos de los animales que nadaban en aquel antiguo mar permanecen sepultados en arenisca. Después de varias campañas, el esfuerzo de Gingerich y su equipo recibió una espléndida recompensa: la primera prueba de pies en los Cetáceos. Eso eran las diminutas extremidades posteriores que desenterraron, pertenecientes a un cetáceo parecido a una serpiente de mar de 18 metros de largo, llamado *Basilosaurus*.

Los fósiles hasta entonces conocidos de *Basilosaurus*, un monstruo completamente acuático que se había deslizado por los mares hace entre 40 y 37 millones de años, conservaban sólo un fémur parcial, vestigial a criterio de sus descubridores. Pero las patas y pies bien formados que el nuevo hallazgo revelaba indicaban funcionalidad. Aunque, al medir menos de medio metro de longitud, las extremidades no le habrían probablemente ayudado a nadar, ni, por supuesto, a caminar en tierra, sí hubieron de servirle a *Basilosaurus*, de serpentino cuerpo, en su apareamiento acuático. Fuera cual fuera su misión, si es que tenían alguna, las pequeñas extremidades encerraban un profundo significado filogenético. "De inmediato pensé: nos encontramos *10 millones* de años después de *Pakicetus*", recuerda Gingerich. "Si estos animales presentan todavía pies y dedos, ello quiere decir que tenemos 10 millones de años de historia en los que buscar." Las ballenas andantes dejaron de ser una broma.

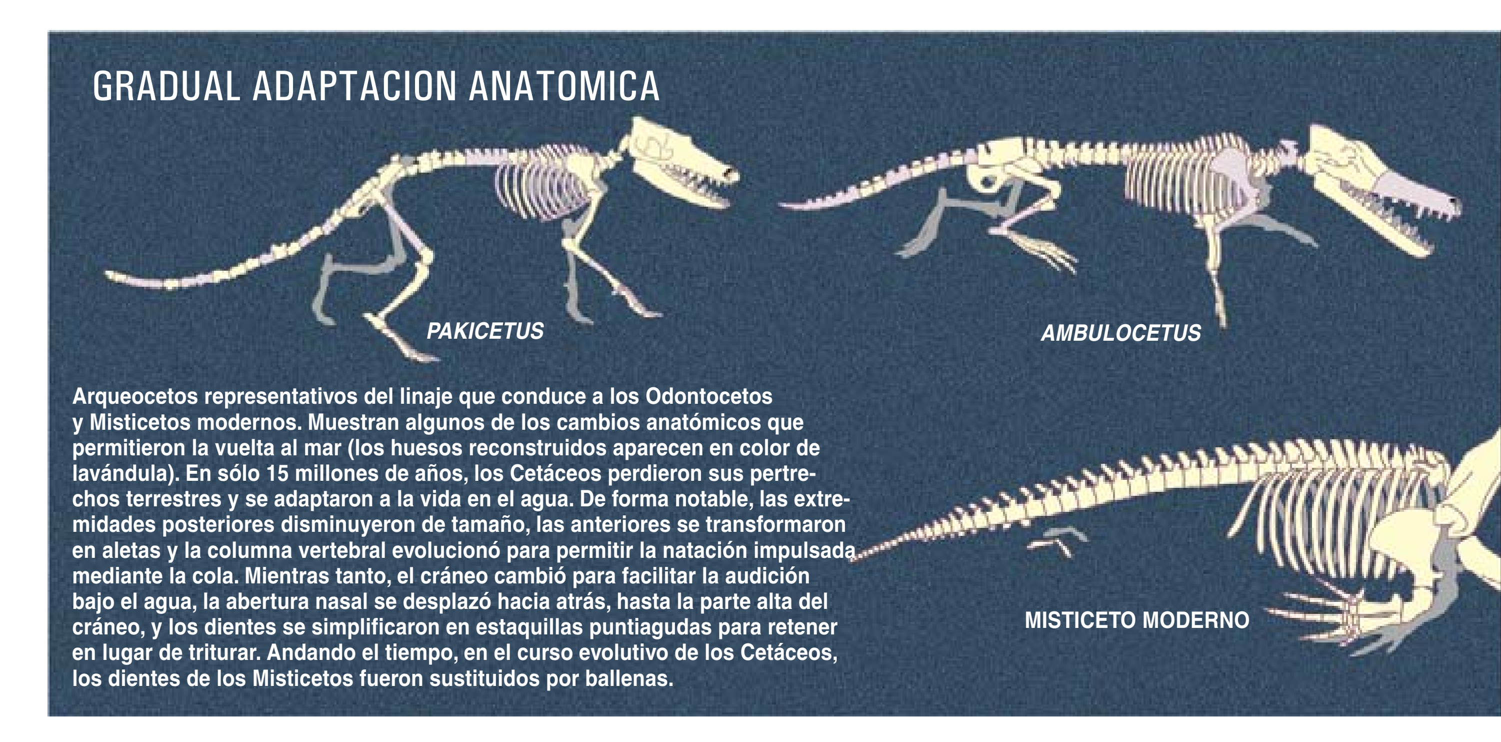
Emergieron, por fin, en 1992. Un equipo dirigido por J. G. M. (Hans) Thewissen, de la facultad de medicina de las Universidades del Nordeste de Ohio, recuperó de rocas marinas de 48 millones de años de antigüedad del norte de Pakistán un esqueleto casi completo de un animal intermedio entre los cetáceos modernos y sus antepasados terrestres. Sus grandes patas y su potente cola revelaban una fuerte capacidad natatoria, mientras que los robustos huesos de las extremidades y sus articulaciones móviles del codo y la muñeca sugerían la capacidad de andar sobre tierra. Thewissen llamó al espécimen *Ambulocetus natans*: el cetáceo que anda y nada.

Formas cambiantes

Desde entonces, Thewissen, Gingerich y otros han desenterrado numerosos fósiles que protagonizaron estadios subsiguientes de la transición de la tierra al mar. El panorama que surge de estos ejemplares es el siguiente: *Ambulocetus* y su estirpe (todos ellos descendientes de los Pakicétidos, más terrestres) dieron origen a animales de hocico largo y fino, los Remingtonocétidos, y a los intrépidos Protocétidos, los primeros cetáceos lo bastante marineros para expandirse desde Indo-Pakistán a todo el globo. De los Protocétidos surgieron los Durodontinos, parecidos a delfines, los probables progenitores de los serpentiformes Basilosaurinos y los cetáceos modernos.

Además de perfilar la ramificación del árbol genealógico de los Cetáceos, esta gavilla de descubrimientos ha permitido seguir la pista de muchos de los espectaculares cambios anatómicos y fisiológicos que posibilitaron a los Cetáceos establecer su residencia permanente en el océano. Algunas de las primeras adaptaciones, nos lo enseña *Pakicetus*, pertenecen al oído. En el agua el sonido se propaga de un modo distinto que en el aire. Los oídos de los humanos y de otros animales terrestres poseen tímpanos delicados y planos, o membranas timpánicas, para percibir el sonido transmitido por el aire; en cambio, los Cetáceos modernos tienen gruesos y largos ligamentos timpánicos, incapaces de percepción sonora. En su lugar, adquiere esta función la bulla, un hueso que en los Cetáceos se ha vuelto muy denso y puede, así, transmitir el sonido procedente de un medio más denso a zonas más profundas del oído. La bulla de *Pakicetus* muestra alguna modificación en dicha dirección, pero el animal conservó un tímpano propio de mamífero terrestre, incapaz de funcionar en el agua.

Así las cosas, ¿para qué le servían a *Pakicetus* sus bullas engrosadas? Thewissen ve una analogía con las tortugas. Igual que éstas oyen al captar vibraciones del suelo a través de su caparazón, *Pakicetus* pudo quizás haber empleado sus bullas para captar sonidos transmitidos por el suelo. Si se toman en consideración nuevas pruebas postcraneales, además de la morfología del oído, Thewissen imagina a *Pakicetus* como un depredador que cazaba al acecho, tal vez en ríos someros, con la cabeza apoyada en el suelo; se alimentaría de las presas que se acercaran

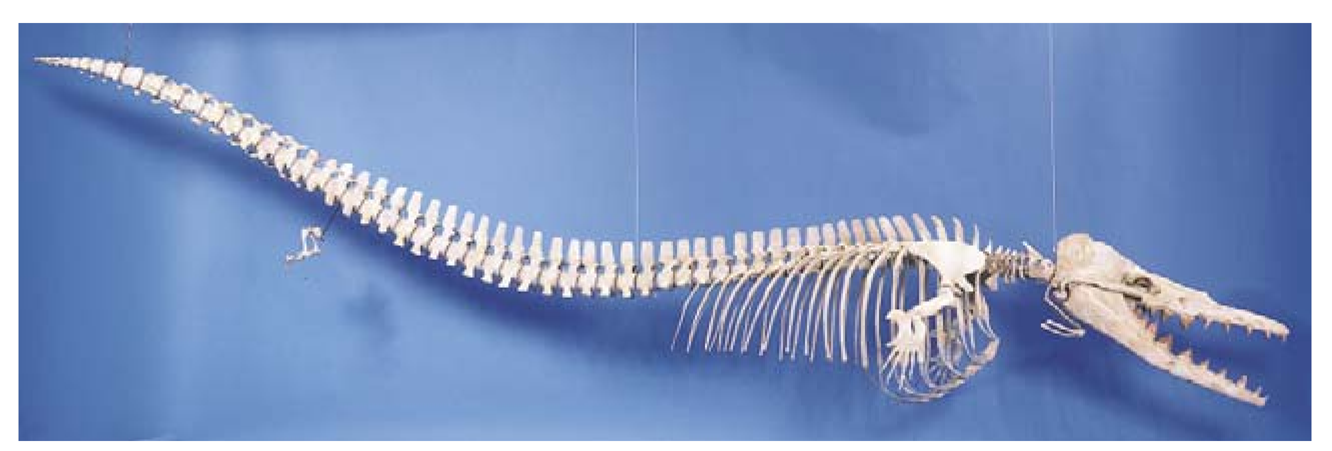


Arqueocetos representativos del linaje que conduce a los Odontocetos y Misticetos modernos. Muestran algunos de los cambios anatómicos que permitieron la vuelta al mar (los huesos reconstruidos aparecen en color de lavándula). En sólo 15 millones de años, los Cetáceos perdieron sus pertrechos terrestres y se adaptaron a la vida en el agua. De forma notable, las extremidades posteriores disminuyeron de tamaño, las anteriores se transformaron en aletas y la columna vertebral evolucionó para permitir la natación impulsada mediante la cola. Mientras tanto, el cráneo cambió para facilitar la audición bajo el agua, la abertura nasal se desplazó hacia atrás, hasta la parte alta del cráneo, y los dientes se simplificaron en estaquillas puntiagudas para retener en lugar de triturar. Andando el tiempo, en el curso evolutivo de los Cetáceos, los dientes de los Misticetos fueron sustituidos por ballenas.

a abrevar. A Thewissen le parece incluso más probable que *Ambulocetus* utilizara esta audición inercial, porque presentaba los inicios de un canal que unía la mandíbula y el oído. Apoyando su mandíbula sobre el suelo (estrategia seguida por los cocodrilos actuales), *Ambulocetus* oiría la aproximación de sus presas. En síntesis, las mismas características que permitieron que los cetáceos primitivos percibieran sonidos procedentes del suelo, los preadaptaron para oír en el agua.

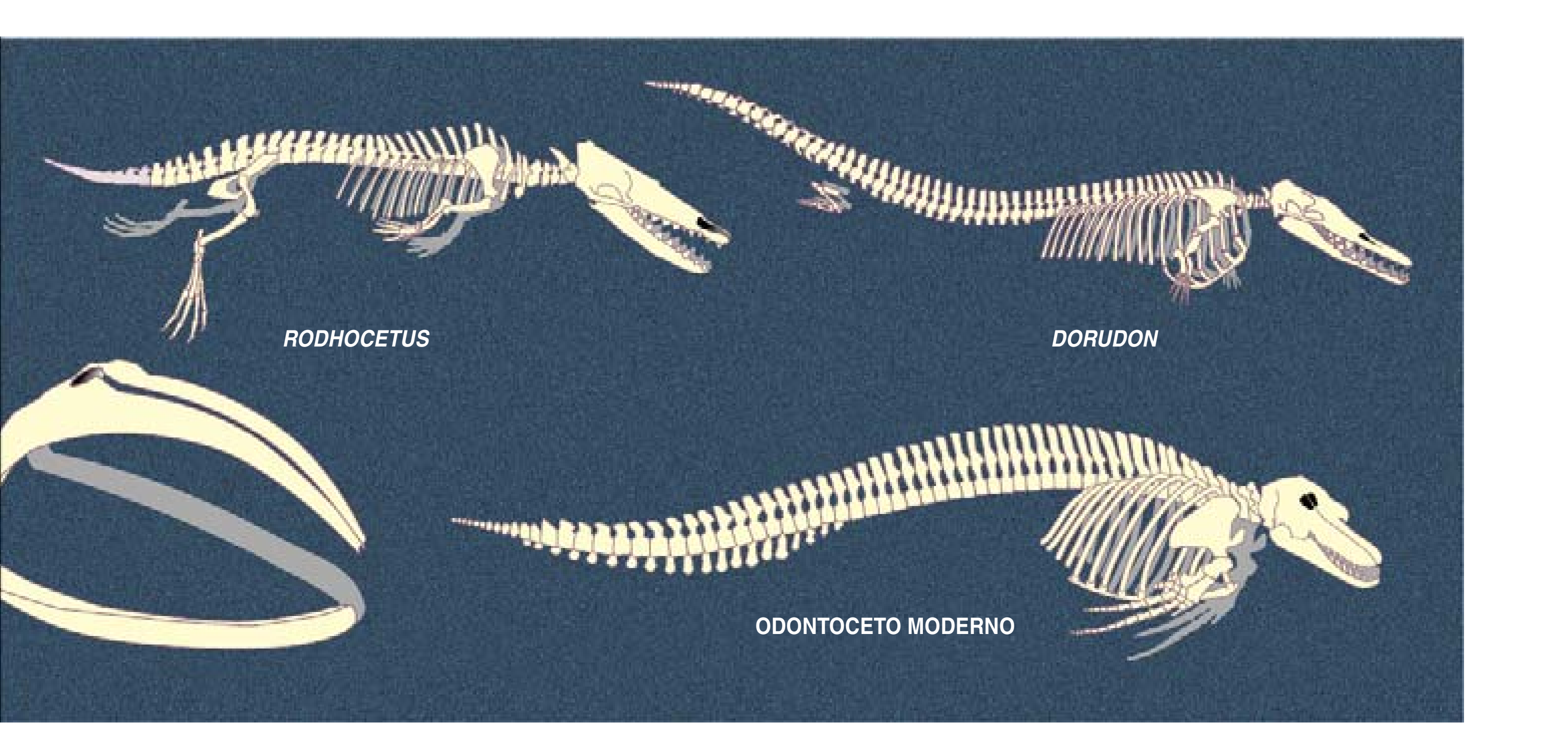
Zhe-Xi Luo, del Museo Carnegie de Historia Natural de Pittsburgh, ha demostrado que por la época de los Basilosaurinos y los Dorudontinos, los primeros cetáceos completamente acuáticos, habría ya evolucionado el ligamento timpánico en forma de cuerda. Además, se habían formado senos aéreos, presumiblemente llenos de tejido esponjoso, alrededor del oído medio, con lo que se ofrecía una mejor resolución sonora y pistas direccionales para la audición subacuática. Mientas tanto, añade, con el canal auditivo externo cerrado (un prerrequisito para el buceo profundo), la mandíbula inferior adoptaba un papel auditivo cada vez más importante, desarrollando un canal lleno de grasa, capaz de conducir el sonido de vuelta al oído medio.

En el curso evolutivo posterior del oído de los cetáceos, los Odontocetos y los Misticetos siguieron caminos separados. Mientras que los cetáceos con dientes desarrollaron las características necesarias para emitir y percibir sonidos de alta frecuencia, permitiendo así la ecolocación para la caza, las ballenas desarrollaron la capacidad de producir y recibir sonidos de muy baja frecuencia, lo que les facultaba para comunicarse entre sí a través de largas distancias. Los huesos óticos fósiles de cetáceos muestran que, hace unos 28 millones de años, los odontocetos primitivos poseían ya algunas de las estructuras óseas necesarias para percibir sonidos agudos; se hallaban, pues, capacitados para una ecolocación al menos modesta. Mucho más



2. *DORUDON*, un arqueoceto de 4,5 metros de longitud. Parecido a un delfín, vagaba por los mares en el período comprendido aproximadamente entre hace 40 y 37 millones de años. Pudo ser el antepasado de los cetáceos modernos.

PORTIA SLOAN (Ilustraciones); MUSEO DE EXPOSICIONES DE HISTORIA NATURAL DE LA UNIVERSIDAD DE MICHIGAN (fotografía)



oscuro es el origen de la audición de baja frecuencia de los Misticetos, aunque las pruebas fósiles de dicho grupo se remontan a hace 34 millones de años.

Otro cambio notable del cráneo se refiere al desplazamiento de las cuencas oculares, desde una posición sobre la cabeza, como en los cocodrilos, en *Pakicetus* y *Ambulocetus*, hasta otra lateral en los Protocétidos, más acuáticos, y en los cetáceos posteriores. La abertura nasal migró hacia atrás, desde la punta del hocico en *Pakicetus* hasta la parte superior de la cabeza en los cetáceos modernos, formando el espiráculo. También la dentición de los Cetáceos cambió de forma; los molares trituradores de cúspides complejas de los antepasados mamiferianos primitivos se convirtieron en los dientes simples y puntiagudos de los Odontocetos modernos, que sujetan y tragan su alimento sin masticarlo. Los Misticetos perdieron sus dientes y desarrollaron placas de barbas (o ballenas) en forma de peines que penden de la mandíbula superior y filtran el plancton del agua.

Las adaptaciones más evidentes que constituyen el cambio versátil de los Cetáceos atañen a su figura hidrodinámica y sus capacidades inigualadas de natación. No resulta sorprendente que, por el camino, surgieran extrañas formas anfibias. *Ambulocetus*, por ejemplo, conservó las articulaciones flexibles del hombro, el codo, la muñeca y los dedos de sus antepasados terrestres; poseía una pelvis capaz de sostener su peso en tierra. Pero las extremidades posteriores, desproporcionadamente grandes, y los pies en canalete de ese animal habrían hecho que su andadura en tierra fuera desmañada. Sin embargo, estas mismas características eran perfectas para moverse nadando por los bajíos repletos de peces del Tetis.

Adentrarse en mar abierto requirió modificaciones adicionales, muchas de las cuales aparecen en los Protocétidos. A tenor de la investigación realizada en torno a *Rodhocetus*, presentaba comprimidos los huesos del antebrazo, en vías de convertirse en eficientes desde el punto de vista hidrodinámico. Sus pies largos y delicados eran seguramente palmeados, como las aletas que utilizan los buceadores humanos. *Rodhocetus* muestra, asimismo, adaptaciones acuáticas en su pelvis; la fusión de las vértebras del sacro está reducida, lo que libera la parte baja de la espina dorsal para impulsar el movimiento de la cola. Dichas características sugieren que *Rodhocetus* efectuaba un chapoteo pausado, como el de un perro, y una rápida combinación de impulsión mediante las patas posteriores y la cola, como las nutrias, bajo el agua. Cuando se dirigía a tierra para reproducirse o para tomar el sol, se movía a saltos, como un otario o león marino.

Por la época de los Basilosaurinos y Dorudontinos, los Cetáceos ya eran plenamente acuáticos. Como ocurre con los cetáceos modernos, el hombro permaneció móvil, mientras que el codo y la muñeca se tornaron rígidos, formando aletas para timonear y equilibrar. En la parte posterior del esqueleto sólo quedaron extremidades muy pequeñas; la pelvis se había reducido en proporción. Del análisis de las vértebras de *Dorudon*, realizado por Mark D. Uhen, del Instituto Cranbrook de Ciencias de Bloomfield Hills, se desprende una vértebra caudal con un perfil redondeado. Los cetáceos modernos poseen un hueso con una forma similar, la llamada vértebra de bola, en la base de su aleta caudal. Por ello Uhen sospecha que los Basilosaurinos y Durodontinos tenían aletas caudales y nadaban de manera parecida a como lo hacen los modernos cetáceos, utilizando la oscilación caudal. Se trataba de un modo de locomoción muy eficiente desde el punto de vista energético: el movimiento generado en un solo

punto de la columna vertebral confiere potencia al movimiento vertical de la cola en el agua, en tanto que la aleta caudal genera la fuerza de avance.

Sigue sin saberse el momento exacto en el que los Cetáceos perdieron sus extremidades. Un hallazgo reciente en el estado de Washington nos muestra una ballena de 27 millones de años de antigüedad de cuyo estudio se desprende que las patas de los Cetáceos persistieron durante mucho más tiempo de lo que se venía admitiendo. Sin embargo, unos 50 millones de años después de que sus antepasados cuadrúpedos vadearan por primera vez en las cálidas aguas del Tetis, los Cetáceos actuales se manifiestan singularmente esbeltos. Reducidas sus extremidades posteriores hasta vestigios invisibles por fuera, la pelvis se ha convertido en mero punto de anclaje de unos músculos minúsculos, muy pocos, sin relación con la locomoción.

DEL AGUA DULCE AL AGUA SALADA

La mayoría de los mamíferos (los grandes, en particular) no puede vivir sin agua dulce. Un bien de difícil alcance para los mamíferos marinos. Las focas y los leones marinos obtienen agua de los peces que les sirven de alimento; algunos comen nieve para conseguir la ración necesaria; los manatíes buscan la procedente de ríos. Los cetáceos la consiguen de su dieta y de sorbitos de su entorno salado.

¿Cuándo desarrollaron los Cetáceos, que evolucionaron a partir de un mamífero terrestre bastante grande (y, por tanto, dependiente del agua dulce), un sistema capaz de habérselas con el exceso de sal asociado con la ingestión de agua de mar? El estudio de los isótopos estables del oxígeno ha proporcionado algunas pistas. En la naturaleza, el oxígeno se encuentra principalmente en dos formas, o isótopos: ^{16}O y ^{18}O. La proporción de estos isótopos en el agua dulce difiere de la que se da en el agua de mar; la primera contiene más ^{18}O. Puesto que los mamíferos incorporan en sus dientes y huesos en desarrollo el oxígeno procedente del agua que beben, los restos de animales que ingieren agua dulce pueden distinguirse de los que incorporan agua de mar.

Para hacerse una idea de cuándo podían los cetáceos haber pasado de un sistema de osmorregulación basado en el agua dulce a otro basado en el mar, el grupo dirigido por J. G. M. (Hans) Thewissen analizó las proporciones isotópicas de oxígeno en dientes fósiles. Los valores isotópicos de oxígeno para los Pakicétidos, los cetáceos más primitivos, revelan que bebían agua dulce, como cabría predecir a partir de otras indicaciones de que buena parte de su tiempo transcurría en tierra. En cambio, las medidas isotópicas de *Ambulocetus*, que era anfibio, varían mucho, y algunos ejemplares no muestran indicios de ingestión de agua dulce. ¿Cómo explicarlo? Aunque se sabe que *Ambulocetus* pasaba tiempo en el mar (a partir de la naturaleza marina de las rocas en las que se encuentran sus fósiles), quizá todavía tenía que ir a tierra para beber. O quizá permaneciera en agua dulce la primera parte de su vida (cuando sus dientes se mineralizaron) y sólo después penetrara en el mar.

Sin embargo, los Protocétidos, que presentan más adaptaciones esqueléticas a la vida acuática, muestran exclusivamente valores isotópicos marinos, lo que indica que sólo bebían agua salada. Así, escasos millones de años después de que los primeros cetáceos evolucionaran, sus descendientes se habían adaptado a concentraciones elevadas de sales. Sin duda, esta innovación fisiológica desempeñó un papel importante a la hora de facilitar la dispersión de los Protocétidos por todo el globo.

La importancia del astrágalo

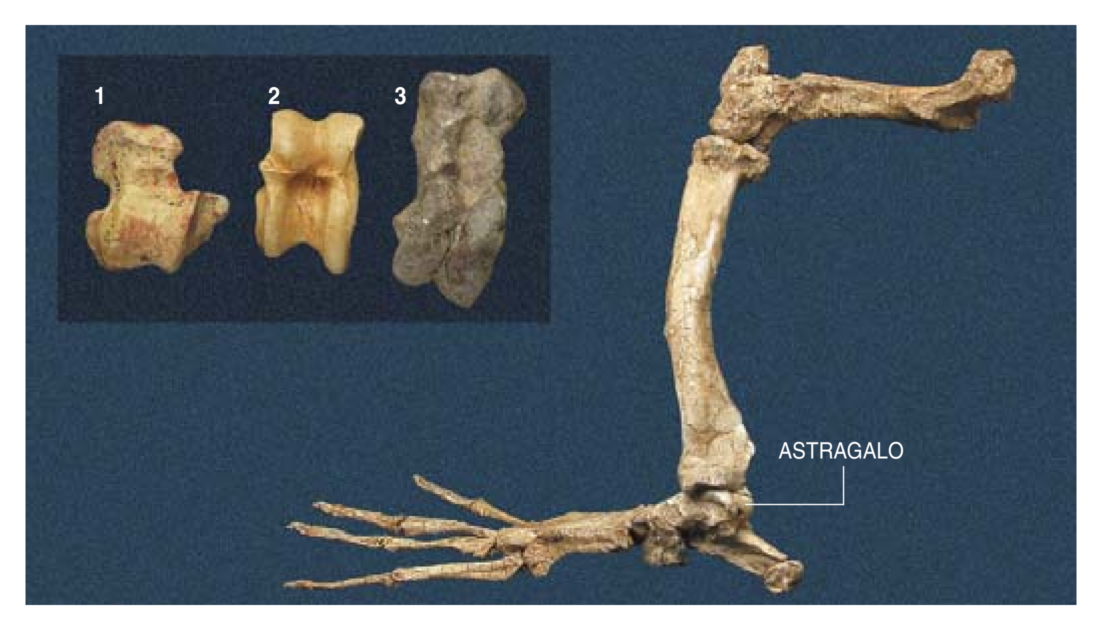
Los fósiles recuperados durante los años ochenta y noventa posibilitaron un avance espectacular en el conocimiento de la evolución de los Cetáceos. Todas las señales morfológicas apuntaban hacia un origen mesoníquido. Las morfológicas, no las genéticas. En efecto, en diversos laboratorios de los Estados Unidos, Bélgica y Japón se estaba fraguando una hipótesis alternativa sobre la filogenia de los Cetáceos. Los biólogos moleculares, tras haber desarrollado técnicas refinadas para el análisis del ADN, llevaron un paso más allá las conclusiones, basadas en la inmunología, a las que había llegado Boyden en los sesenta. Los Cetáceos no sólo guardaban un parentesco con los Artiodáctilos más estrecho que con cualesquiera otros mamíferos vivos; de hecho, los Cetáceos eran artiodáctilos, una derivación de esta rama del árbol genealógico de los Mamíferos. En particular, algunos trabajos señalaban un parentesco cercano entre cetáceos e hipopótamos. Ganó fuerza esta hipótesis en 1999, a raíz de los análisis que el grupo de Norihiro Okada, del Instituto Politécnico de Tokio, realizó sobre fragmentos de ADN no codificador denominados SINE (elementos dispersos cortos).

La conexión ballenas-hipopótamos se recibió con escepticismo entre los paleontólogos partidarios del origen mesoníquido. Mientras que los Mesoníquidos aparecieron en el momento, el lugar y la forma oportunos para ser considerados progenitores de los Cetáceos, el registro fósil no ofrecía ningún antepasado artiodáctilo que fuera plausible —desde los puntos de vista temporal, geográfico y morfológico— para los Cetáceos; mucho menos, un espécimen que vinculara de un modo nítido a éstos con los hipopótamos.

Para resolver la controversia se requería dar con el elemento clave: el hueso del tobillo de los cetáceos primitivos. Los morfólogos acostumbran definir a los Artiodáctilos atendiendo a determinados rasgos del astrágalo, hueso del tobillo que facilita la movilidad. De manera específica, el astrágalo de los Artiodáctilos se caracteriza por poseer dos superficies de articulación acanaladas, parecidas a poleas. Una se conecta con la tibia; la otra se articula con huesos del tobillo más distales. Si los Cetáceos descienden de los Artiodáctilos, razonábase, los individuos que no hubieran todavía alcanzado una plena adaptación a la vida en el mar deberían portar este astrágalo de doble polea.

La ansiada pieza del rompecabezas llegó en otoño del año 2001, cuando Gingerich y Thewissen anunciaron sendos descubrimientos de nuevos fósiles de cetáceos primitivos. En la parte oriental de la provincia del

3. EXTREMIDAD POSTERIOR de *Rodhocetus*. Este cetáceo primitivo conserva el astrágalo, un hueso del tobillo. En el encarte se muestran un astrágalo de mesoníquido (*1*), junto al de un artiodáctilo moderno (*2*) y el de *Rodhocetus* (*3*); este último presenta la forma distintiva de doble polea que caracteriza a todos los astrágalos de los Artiodáctilos, lo que sugiere que los Cetáceos no descienden de los Mesoníquidos, sino de un artiodáctilo primitivo.



DAN ERICKSON

Beluchistán, el equipo de Gingerich había encontrado esqueletos articulados de *Rodhocetus balochistanensis* y un nuevo género de protocétido, *Artiocetus*. El grupo de Thewissen recuperó en un yacimiento fosilífero de los montes Kala Chitta, en el Punjab, gran parte del esqueleto postcraneal de *Pakicetus*, así como el de un miembro más pequeño de la familia Pakicétidos, *Ichthyolestes*. Todos tenían su astrágalo, que mostraba las características distintivas de los Artiodáctilos.

Los huesos del tobillo convencieron a Gingerich y Thewissen, máximos exponentes de la hipótesis de los Mesoníquidos, de que los Cetáceos evolucionaron a partir de los Artiodáctilos. Gingerich acepta incluso la hipótesis de los hipopótamos. Aunque éstos surgieron mucho después que las ballenas, sus antepasados Antracoterios (animales cuyo tamaño iba desde el de un perro al de un caballo y que vivían en ambientes pantanosos) se remontan al menos al Eoceno medio; cabe, pues, que compartieran un antepasado común con los Cetáceos. De hecho, *Rodhocetus* y los Antracoterios comparten rasgos de sus manos y muñecas que no se ven en ningún otro artiodáctilo posterior. Thewissen concede que la hipótesis de los hipopótamos ha ganado en verosimilitud. Pero advierte que la morfología no apunta todavía a que unos artiodáctilos en particular, como los hipopotámidos, constituyan el grupo más emparentado con los Cetáceos, su grupo hermano.

¿En qué han quedado las pruebas favorables a una vinculación entre cetáceos primitivos y Mesoníquidos? A la luz de los nuevos datos sobre los huesos del tobillo, la mayoría de los investigadores se decantan por un fenómeno de convergencia. Las semejanzas detectadas entre ambos grupos reflejarían una evolución convergente, no un origen común. En ese marco explicativo, los Mesoníquidos representarían una vía evolutiva cegada en su extremo. Pero la polémica no se ha apagado. Maureen O'Leary, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, aduce que, mientras todas las pruebas disponibles (morfológicas y moleculares) no se conjuguen en un mismo análisis filogenético, quedará la posibilidad de que los Mesoníquidos se encuentren en la base del linaje de los Cetáceos. Los Mesoníquidos podrían ser artiodáctilos antiguos que invirtieron la tendencia en lo concerniente a los huesos del tobillo. En ese caso, los Mesoníquidos constituirían los parientes más cercanos de los Cetáceos, y los Hipopotámidos, sus parientes vivos más próximos. Contra esa ingeniosa defensa del origen en los Mesoníquidos, a través de la inclusión de éstos en los Artiodáctilos, objetan otros que ello implica arruinar el criterio consolidado de que el tobillo identifica a los Artiodáctilos.

Desentrañar el parentesco exacto entre los Cetáceos y los Artiodáctilos requerirá, a buen seguro, contar con nuevos fósiles, sobre todo los que puedan iluminar los inicios de los Artiodáctilos en general y de los Hipopotámidos en particular. Mucho se conoce ya sobre los Cetáceos, desde su origen hasta el final de los Arqueocetos. Se dará otro paso importante cuando se averigüe de qué manera Misticetos y Odontocetos surgieron de los Arqueocetos y cuándo aparecieron sus rasgos modernos.

Bibliografía complementaria

SKELETONS OF TERRESTRIAL CETACEANS AND THE RELATIONSHIP OF WHALES TO ARTIODACTYLA. J. G. M. Thewissen, E. M. Williams, L. J. Roe y S. T. Hussain en *Nature*, vol. 413, págs. 277-281; 20 de septiembre, 2001.

ORIGINS OF WHALES FROM EARLY ARTIODACTYLS: HANDS AND FEET OF EOCENE PROTOCETIDAE FROM PAKISTAN. Philip D. Gingerich, Munir ul Haq, Iyad S. Zalmour, Intizar Hussain Khan y M. Sadiq Malkani en *Science*, vol. 293, págs. 2239-2242; 21 de septiembre, 2001.

THE ENCICLOPEDIA OF MARINE MAMMALS. Dirigido por W. F. Perrin, Bernd G. Würsig y J. G. M. Thewissen. Academic Press, 2002.

W. Wayt Gibbs

DAVID A. FISHER: Sobrevivir en un mundo inseguro

El Centro de Coordinación del CERT (el Equipo de Respuesta para Emergencias Informáticas), radicado en la Universidad Carnegie-Mellon, es una de las principales líneas de defensa contra intrusos informáticos, ciberterroristas y demás perturbadores de la Red. El propio centro ofrece un blanco natural. Al igual que muchos otros organismos, incrementó sus medidas de seguridad tras los ataques terroristas de septiembre. Para entrar en el edificio de acero y cristal debo explicar mi propósito por el interfono y lucir una sonrisa ante la cámara de la puerta principal. Dentro ya, he de firmar en presencia de dos guardias de seguridad uniformados y esperar, antes de acceder a la zona "reservada", a que me acompañe alguien autorizado, que pasará una tarjeta por un lector (vigilado por otra cámara). Pero la seguridad que aportan estas medidas —como el cacheo que sufrí en el aeropuerto y la serie de contraseñas que debo introducir en mi ordenador portátil— es más aparente que real. En una sociedad abierta la seguridad perfecta es un sueño imposible.

Esa inseguridad afecta en especial a los sistemas informáticos. Con gran celeridad se van tornando más complicados, interdependientes, indispensables... y fáciles de sabotear. Los entramados de máquinas que controlan los transportes, las transacciones bancarias, las redes eléctricas y todo aquello que se conecte a Internet constituyen sistemas sin límites, sin un contorno que los acote, observa David A. Fisher, investigador del CERT. "Nadie, ni siquiera el propietario, tiene un conocimiento completo y preciso de la topología o del estado del sistema. El control central es inexistente o ineficaz."



STEVE MELLON

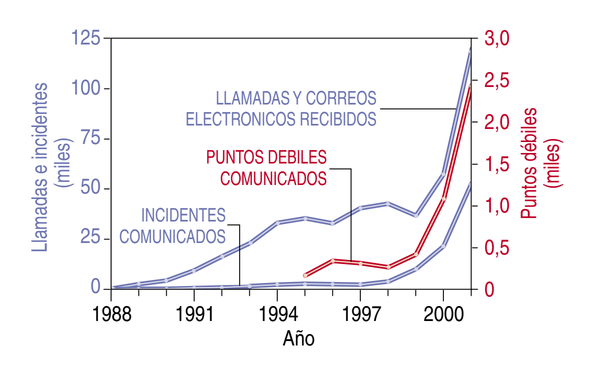
En esta carencia de fronteras se pierden los afanes de los informáticos por intuir cómo se comportarían las infraestructuras fundamentales ante una agresión. "Aún no existe una teoría formal de los sistemas ilimitados", dice Fisher. Parece preocuparle. En sus 40 años de trayectoria profesional ha acaudillado un enfoque riguroso de la informática. Estudió cálculo automático cuando todavía estaba encuadrado en las matemáticas. Contribuyó de manera decisiva a la creación de Ada, un lenguaje informático avanzado que elaboró en los años setenta el Departamento de Defensa; el objetivo era reemplazar un galimatías de dialectos de programación menos disciplinados.

Fundó en el decenio de 1980 una empresa que vendía componentes de programas, una de las primeras que intentó distribuir "piezas intercambiables" que acelerasen el desarrollo de nuevos programas. A principios de la década siguiente dirigió un proyecto del Instituto Nacional de Patrones y Medidas (NIST) encaminado a que la industria de la programación emulase el mercado de ordenadores, donde muchas empresas competidoras fabrican elementos normalizados que se combinan en miles de productos.

Los esfuerzos de Fisher por poner orden en sistemas caóticos han encontrado a menudo resistencias. El Pentágono indicó a todos sus programadores que usaran Ada, pero los subcontratistas pusieron el grito en el cielo. La empresa que Fisher había fundado se vino abajo por falta de financiación. La hostilidad del Congreso acabó con su programa del NIST. Mas para 1995, el año en que entró en el CERT, los expertos en seguridad se percataban ya de que —son palabras del director del CERT, Richard D. Pethia— "nuestras técnicas de seguridad tradicionales no iban a aguantar mucho más".

El Equipo se fundó en 1988 después de que un estudiante de la Universidad Cornell difundiera un gusano que se propagaba por sí mismo e inutilizase una considerable fracción de Internet. Ahora hay más de 100 equipos de esa naturaleza por todo el mundo; el centro del CERT en la Carnegie Mellon

participa en la coordinación mundial contra lo que Pethia llama "incidentes de fuerte impacto: los ataques, como los recientes de los gusanos Nimda y Code Red, que afectan a cientos de miles de ordenadores, los dirigidos contra la infraestructura misma de Internet y los que pudieran poner en peligro vidas o en un brete a la defensa nacional".



Las llamadas al CERT que informan de nuevos virus y gusanos informáticos y de ataques de intrusos —o de nuevos fallos de los programas que permiten el acceso a los infractores— han ido duplicándose cada año

Pero cada año el número de incidentes se duplica, el refinamiento de los infractores crece y los defensores se rezagan un poco más. De manera que, si bien el CERT sigue reuniendo a su equipo de especialistas en combatir a los piratas informáticos en cuanto se conoce un ataque a gran escala, la mayor parte de sus fondos (la mitad de los cuales proviene del Departamento de Defensa) se dedica ahora a la investigación.

Para Fisher, la cuestión más apremiante radica en diseñar sistemas que, pese a ser ilimitados —inseguros de por sí—, posean "capacidad de sobrevivir"; es decir, que se las ingenien para llevar a cabo su misión primordial, llegando a sacrificar componentes si fuese necesario, aun tras haber sufrido daños. No se sabe todavía construir un sistema informático tan flexible, pero el grupo de Fisher puso en circulación en febrero un nuevo lenguaje de programación que quizá contribuya a conseguirlo.

Al estudiar las matemáticas de los efectos en cadena que dominan los sistemas ilimitados, Fisher vio que era necesario un nuevo lenguaje. El ratón actúa sobre el módem, que activa un encaminador, que se comunica con un servidor de la Red, que ordena al robot de un almacén que tome un libro, que se expide ese mismo día. O la rama de un árbol cercena una línea de alta tensión, un transformador se sobrecarga, una subestación queda fuera de servicio y en cuestión de horas se va la luz en seis provincias.

Los ingenieros saben, en líneas generales, cuál es la misión que debe llevar a cabo un sistema. La red eléctrica, por ejemplo, ha de suministrar 220 volt a 50 hertz. "La cuestión es: ¿qué reglas simples deben regir cada nodo de la red eléctrica para que ésta cumpla su cometido a pesar de los fallos de los equipos, los desastres naturales y los ataques deliberados?", plantea Fisher. Llama a tales reglas "algoritmos emergentes", porque algunos comportamientos muy complejos (la construcción de un hormiguero, por ejemplo) son el resultado de un programa simple ejecutado por una plétora de operadores autónomos (en el ejemplo, por miles de hormigas).

Fisher y sus colaboradores se dieron cuenta de que, si se atenían a los lenguajes informáticos ordinarios, nunca podrían responder con precisión esa pregunta fundamental "porque obligan a proporcionar descripciones precisas y completas. Pero no se dispone de una información completa sobre la red eléctrica, o sobre un sistema sin fronteras", comenta. Así que elaboraron un lenguaje de programación completamente nuevo, Easel ("caballete").

"Easel, prosigue, nos permite simular sistemas ilimitados, incluso cuando poseemos una información incompleta de su estado. Cabe, pues, escribir programas que ayuden a controlar la red eléctrica o a prevenir ataques que causen una diseminada denegación de servicios, como los que inutilizaron los centros de Internet de CNN y Yahoo! hace unos años."

Gracias a un tipo de lógica diferente de la empleada por los lenguajes de programación precedentes, Easel facilita el razonamiento abstracto. "La informática ha trasegado siempre con nombres propios. Easel trasiega con nombres comunes: perro, en vez de Tobi." Esta diferencia cambia de arriba abajo los programas. Un programa escrito en uno de los lenguajes de costumbre sólo incluiría los atributos caninos que el programador juzgara importantes. "La lógica del lenguaje de programación añadiría la premisa de que las demás propiedades no cuentan. Así es factible cualquier experimento virtual sobre perros, pero se producen respuestas incorrectas." Por eso los modelos informáticos de la realidad deban cotejarse con observaciones.

Con Easel "se especifican sólo aquellas propiedades de los perros de las que se está seguro: que tienen cuatro patas y dos ojos, que miden entre catorce centímetros y un metro veinte de alto. Pero no se concreta cómo debe representar el ordenador un perro en particular. Se garantiza de esta forma que la simulación no producirá una respuesta incorrecta. Eso sí, algunas veces el sistema responderá: 'No tengo la información suficiente para contestar la pregunta'".

Easel facilita la predicción de cómo podrían un nuevo ciberpatógeno o un error de programación dar al traste con un sistema. El investigador del CERT Timothy J. Shimeall escribió hace poco un programa en Easel de 250 líneas que crea modelos de ataques contra Internet parecidos a los del gusano Code Red. No sería difícil adjuntarlo a un programa que simule una gran red empresarial y poner a prueba con el combinado estrategias que detengan la reproducción del gusano.

Fisher y algunos más están ya valiéndose de Easel para buscar algoritmos emergentes que mejoren la capacidad de supervivencia de varias infraestructuras cruciales. "Se puede considerar al adversario como un sistema competidor que aspira a su propia supervivencia. La manera de ganar esa guerra no es levantar barreras que interfieran nuestros objetivos, sino impedir que el oponente alcance los suyos."

FUENTE: CERT COORDINATION CENTER (WWW.CERT.ORG)

Bioquímica de la obesidad

Proteínas mitocondriales

La obesidad ha alcanzado hoy, al inicio del siglo XXI, proporciones epidémicas. No es necesario insistir en que la obesidad produce un aumento de morbimortalidad por enfermedades cardiovasculares o cancerosas. Además, el tratamiento de las complicaciones secundarias a la obesidad lleva camino de convertirse en una insoportable carga económica para los sistemas nacionales de salud.

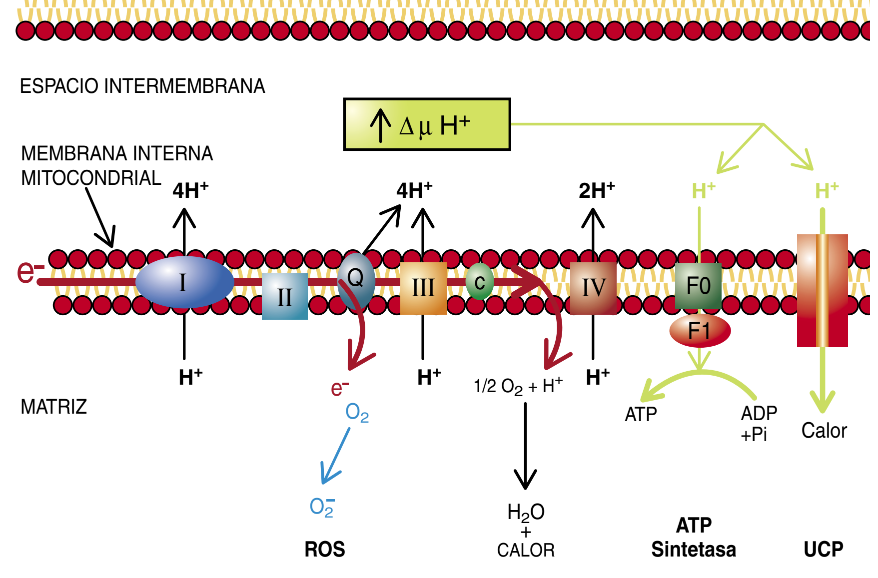
La obesidad tiene un componente ambiental resultado de cambios dietéticos y de la tendencia al sedentarismo. Presenta también un componente genético, en virtud del cual algunos individuos parecen más sensibles al efecto promotor de obesidad de la dieta rica en grasa. Estos patrones genéticos que hoy son una desventaja, fueron en el pasado, cuando los alimentos eran escasos y hacía falta moverse para conseguirlos, muy ventajosos, dado que aumentaban la eficiencia para almacenar energía.

Desde un punto de vista termodinámico, la obesidad es el resultado de un balance positivo entre la ingesta y el gasto energético. Por lo tanto, la identificación de los mecanismos moleculares que controlan la ingesta y el gasto energético es un buen punto de partida para resolver el problema. En los últimos años, especialmente desde que se descubrió la hormona leptina, se ha avanzado bastante en el conocimiento de los mecanismos que controlan la ingesta. Sin embargo, los que controlan el gasto energético siguen siendo una incógnita.

Para identificar los mecanismos moleculares reguladores del gasto energético, la mitocondria, orgánulo celular cuya función principal consiste en la producción y disipación de energía, aparece en principio como la candidata obvia donde investigar. La mitocondria está formada por una doble membrana, una externa y otra interna. El espacio entre ambas se denomina “espacio intermembrana”. La matriz mitocondrial es el espacio que abarca la membrana interna.

En la membrana interna se alojan diversos complejos proteicos que conforman la cadena respiratoria. Tales complejos transportan electrones cedidos por moléculas producidas durante la oxidación de lípidos y carbohidratos. Durante este proceso se produce el bombeo activo de protones desde la matriz mitocondrial hasta el espacio intermembrana atravesando la membrana interna mitocondrial. El proceso genera un gradiente electroquímico y determina el aumento del potencial de membrana que actúa como una fuerza motriz que reintroduce los protones en la matriz mitocondrial.





Acoplamiento del transporte de electrones a través de la cadena respiratoria mitocondrial con la síntesis de ATP en la ATP sintetasa. La explicación de la figura se detalla en el texto; respecto a los símbolos: e^- electrón, H^+ protón, I, II, III, IV, Q, c son los complejos proteicos de la cadena respiratoria. $\Delta\mu H$, potencial de membrana; ROS, radicales libres de oxígeno

El transporte de electrones está acoplado con la síntesis de energía, es decir, de trifosfato de adenosina (ATP), en el complejo proteico de la ATP sintetasa. Los protones previamente bombeados hacia el espacio intermembrana entran de nuevo en la matriz utilizando esa enzima y, en presencia de ADP, forman ATP. Por lo tanto, el transporte de electrones en la cadena respiratoria liberados está acoplado a la producción de energía en la ATP sintetasa. Al interponerse a ese proceso, una proteína desacoplante mitocondrial (UCP) permite la reentrada de protones en la matriz mitocondrial sin pasar por la ATP sintetasa, a modo de cortocircuito sin producción neta de energía y disipándose en forma de calor.

Se han identificado diversas proteínas desacoplantes mitocondriales: UCP1, 2, 3. La más conocida y mejor caracterizada es UCP1, que se expresa de forma casi exclusiva en el tejido adiposo marrón de roedores y que es clave en el control de la

termogénesis adaptativa al frío y a la dieta. Sin embargo, dada la ausencia de grasa marrón en humanos adultos, UCP1 no parece desempeñar una función destacada en el control del gasto energético.

En el año 1997 se identificaron la UCP2 y la UCP3. Despertaron justificadas expectativas debido a su distribución tisular en músculo, grasa y macrófagos. Pero las esperanzas depositadas se han disipado al no haber podido confirmarse claramente su papel en el control del gasto energético y en el desarrollo de la obesidad.

En el último año se han publicado los resultados obtenidos con ratones manipulados genéticamente ("Knock outs", que carecían de la proteína) o con modelos transgénicos, que sobreexpresaban las proteínas UCP1, UCP2 y UCP3. De acuerdo con los experimentos con "Knock outs", no se requieren las proteínas UCP1, UCP2 ni UCP3 para mantener el gasto energético ni producen obesidad. Tan sólo los ratones en los que se eliminó UCP1 presentaron problemas para el control de temperatura cuando se sometían al frío.

Sin embargo, los ratones transgénicos que sobreexpresaban las proteínas UCP3 y UCP1 en el músculo esquelético opusieron resistencia al desarrollo de obesidad inducida por dieta. Esta observación no implica que las UCP sean importantes para la obesidad humana. Existen sospechas de que la presencia de cualquier proteína en grandes cantidades (sobreexpresadas) en la membrana interna de la mitocondria podría alterar el transporte de electrones produciendo un desacoplamiento mitocondrial no específico que impediría la acumulación de grasa.

Sin embargo, lo que los experimentos transgénicos prueban es que, desacoplando la mitocondria, se puede evitar el desarrollo de obesidad sin que ello signifique que éste sea un mecanismo fisiológico de control del balance energético. También sugieren que los fármacos que produzcan un desacoplamiento mitocondrial "controlado" podrían llegar a ser una estrategia terapéutica para la obesidad.

Si las UCP no controlan el gasto energético, ¿cuál es su verdadera función? Según parece, las UCP podrían controlar la producción de radicales libres o actuar quizá como válvulas de escape del potencial de membrana mitocondrial facilitando la fosforilación oxidativa en casos de excesivo aporte de nutrientes.

ANTONIO J. VIDAL PUIG
Depto. de Bioquímica Clínica y Medicina
Addenbrooke's Hospital,
Universidad de Cambridge,
Cambridge (U.K.)

Lucha contra la malaria

El ciclo biológico de Plasmodium

La malaria o paludismo es una de las enfermedades más devastadoras del planeta. Cada año afecta a unos 400 millones de individuos, con resultado de muerte para dos millones de ellos. Las víctimas principales son niños del Tercer Mundo.

El agente causante de la enfermedad es *Plasmodium*, un parásito intracelular que se transmite por la picadura de mosquitos infectados. Varios intentos de erradicar esta enfermedad durante el último siglo han fracasado. Ello se explica, en buena medida, por la aparición de parásitos resistentes a los medicamentos aplicados y al desarrollo de resistencia contra insecticidas en los mosquitos vectores.

Ante esa situación, los científicos se esfuerzan por hallar nuevas soluciones para detener el desarrollo de la enfermedad, en particular la búsqueda de una vacuna contra la malaria. Pero esa vía no ha dado los frutos esperados. Se impone, pues, volver al estudio de la biología de *Plasmodium* con el fin de poder diseñar otras estrategias más eficaces.

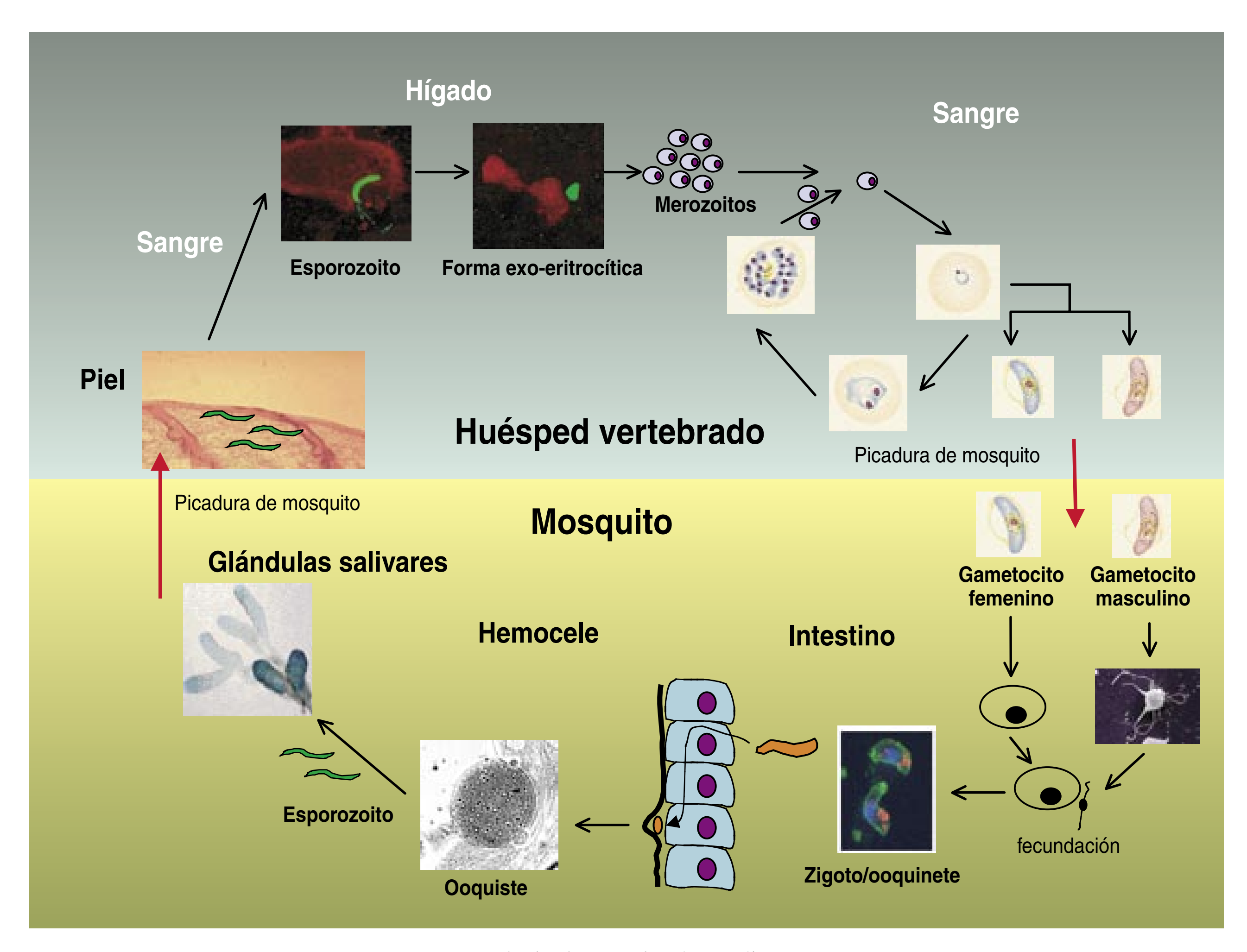
El ciclo biológico de *Plasmodium* comprende varios estadios, que se desarrollan en dos huéspedes diferentes: un huésped vertebrado (desde reptiles hasta humanos, hay un gran número de especies sensibles a distintos tipos de malaria) y un insecto que actúa como vector (el mosquito *Anopheles*).

La malaria se transmite a través de la picadura de un mosquito infectado que porta el protozoo *Plasmodium* en estadio de esporozoito en las glándulas salivares. El mosquito introduce su probóscide en la piel del huésped buscando un capilar con sangre y deposita, debajo de la piel, saliva que contiene los esporozoitos de *Plasmodium*. Desde aquí los esporozoitos migran a la sangre en pocos minutos; el torrente sanguíneo los transporta hasta el hígado. El proceso se desarrolla con suma rapidez. Veinte minutos después de la picadura se encuentran parásitos en el hígado. Se desconoce por qué los esporozoitos de *Plasmodium* se detienen en el hígado, el único órgano que son capaces de infectar.

Una vez en el hígado, cada esporozoito atraviesa varios hepatocitos. Rompe la membrana y cruza el citosol de estas células. Para invadir un hepatocito, induce una invaginación en la membrana de la célula huésped; allí instalado, se tornará parásito intracelular cuando la vacuola iniciada termine por cerrarse con membrana plasmática del hepatocito.

Dentro de esta vacuola parasitófora, cada esporozoito se desarrolla y se divide en el curso aproximado de una semana. Entonces, el hepatocito infectado estalla, liberando miles de nuevos parásitos a la sangre. En este estadio el parásito se llama merozoito, y es el causante de la patología asociada con la malaria. Los merozoitos infectan eritrocitos en la sangre y se reproducen rápidamente. Cada 48 horas, o 72 horas en algunas especies, se liberan a la sangre nuevos merozoitos, causando las crisis de fiebres típicas de la malaria. La destrucción de eritrocitos produce anemia, que puede resultar letal. Sin embargo, la mayoría de las muertes por malaria se deben a la acumulación de eritrocitos infectados en los capilares del cerebro, que dificultan el riego sanguíneo y producen la malaria cerebral. Solamente la especie *Plasmodium falciparum* es capaz de producir malaria cerebral. Se trata, por ello mismo, de la forma más peligrosa.

El estadio de merozoito se caracteriza por la enorme variabilidad de



Ciclo biológico de Plasmodium

las proteínas de su superficie y de las que expone en la membrana de los eritrocitos infectados. Esa disparidad dificulta el reconocimiento por el sistema inmunitario del huésped y constituye un notable obstáculo para el desarrollo de vacunas eficaces.

Algunos merozoitos del torrente sanguíneo se diferencian sexualmente en gametocitos. Cuando otro mosquito *Anopheles* toma sangre de un huésped infectado, se produce la fecundación de los gametocitos dentro del intestino del mosquito. Se inicia así otro estadio de *Plasmodium*, el ooquinete. Esta forma del parásito atraviesa el intestino del mosquito y se enquista en la pared exterior formando un ooquiste, que se desarrolla durante 10 días a tres semanas para formar esporozoitos. El ciclo se cierra cuando los esporozoitos migran a través del hemocele del mosquito hasta las glándulas salivares y las invaden. De ese modo, los mosquitos que han tomado sangre de un huésped infectado por malaria se hallarán capacitados, en dos a tres semanas, para transmitir la enfermedad al picar a un nuevo huésped.

La complejidad del ciclo biológico del *Plasmodium* posibilita, en principio, numerosas estrategias de intervención para detener el desarrollo de la enfermedad. Hace más de treinta años se descubrió que los esporozoitos irradiados con rayos X protegen contra la malaria cuando se inyectan en la sangre. Pero la imposibilidad de producir esporozoitos del protozoo *in vitro* para obtener las grandes cantidades que se requieren en la fabricación de vacunas ha impedido el desarrollo de esta estrategia preventiva.

Actualmente se está investigado en posibles vacunas contra esporozoitos, para detener la enfermedad durante la fase hepática inicial, y contra merozoitos, que aliviarían la patología de la enfermedad durante la fase sanguínea. Otros medios de intervención en los que se está trabajando son el control de las poblaciones de mosquitos usando nuevos insecticidas y el desarrollo de medicamentos anti-malaria.

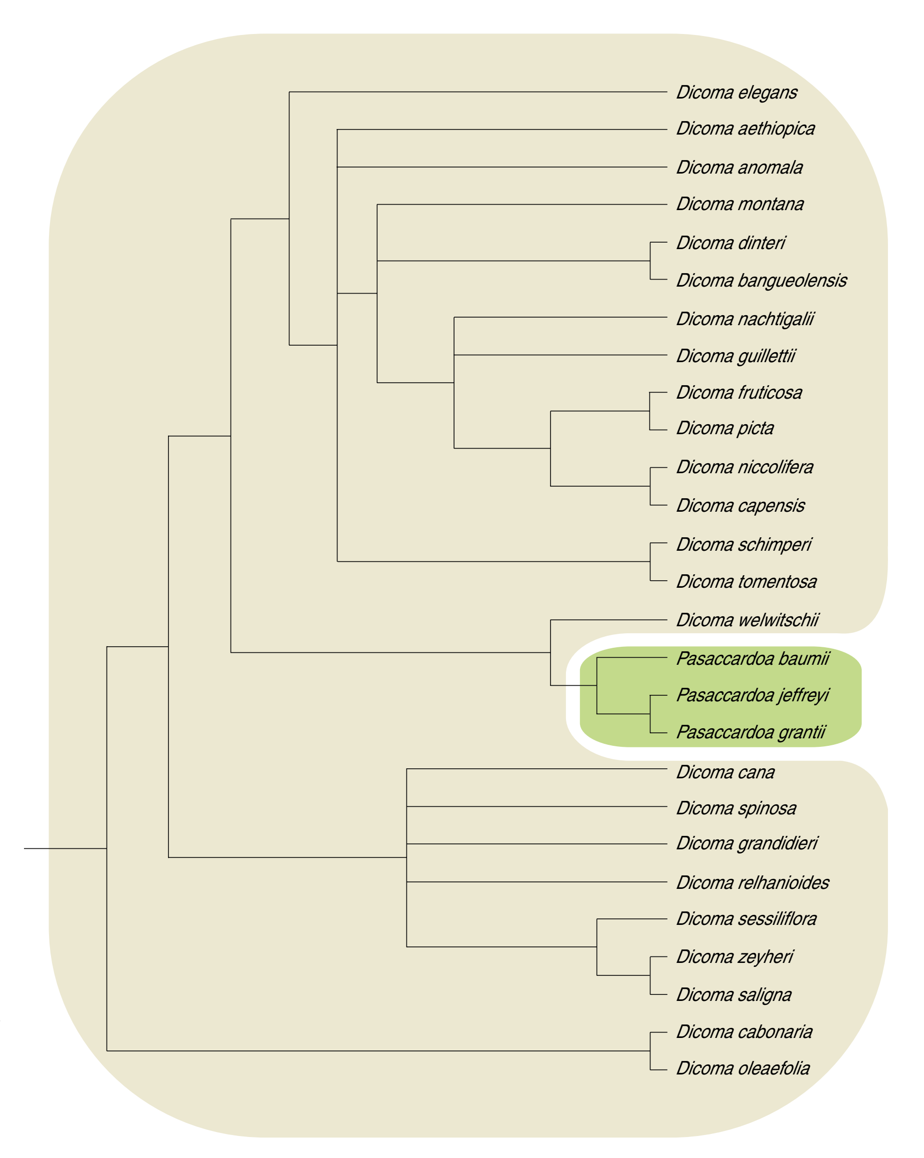
ANA RODRÍGUEZ
Dpto. de Parasitología Médica y Molecular
Facultad de Medicina de la Universidad de Nueva York

Problemas de taxonomía botánica

Relación intergenérica

Para comprender la extraordinaria diversidad de formas que ocurren en la naturaleza, se las ha venido agrupando por afinidades

1. Cladograma en el que se observa que las especies del género Pasaccardoa *se agrupan en un clado situado entre las especies de* Dicoma, *con lo que este último género resulta ser parafilético*



desde tiempos remotos. En las clasificaciones resultantes los individuos se consideraban miembros de un grupo particular, de una especie. El principal criterio de pertenencia a una especie residía en la capacidad de reproducción en el seno de la misma, es decir, de intercambio genético.

A medida que nos vamos alejando de esa primera unidad taxonómica a la que llamamos especie, las clases en las que se agrupan los organismos se tornan más artificiales, es decir, se parecen más a constructos mentales ideados para poner orden en nuestra interpretación de la diversidad biológica. En el conocimiento de las relaciones evolutivas entre los diferentes grupos de organismos, se acepta ahora que las unidades supraespecíficas deben contar con una base evolutiva y representar líneas filogenéticas.

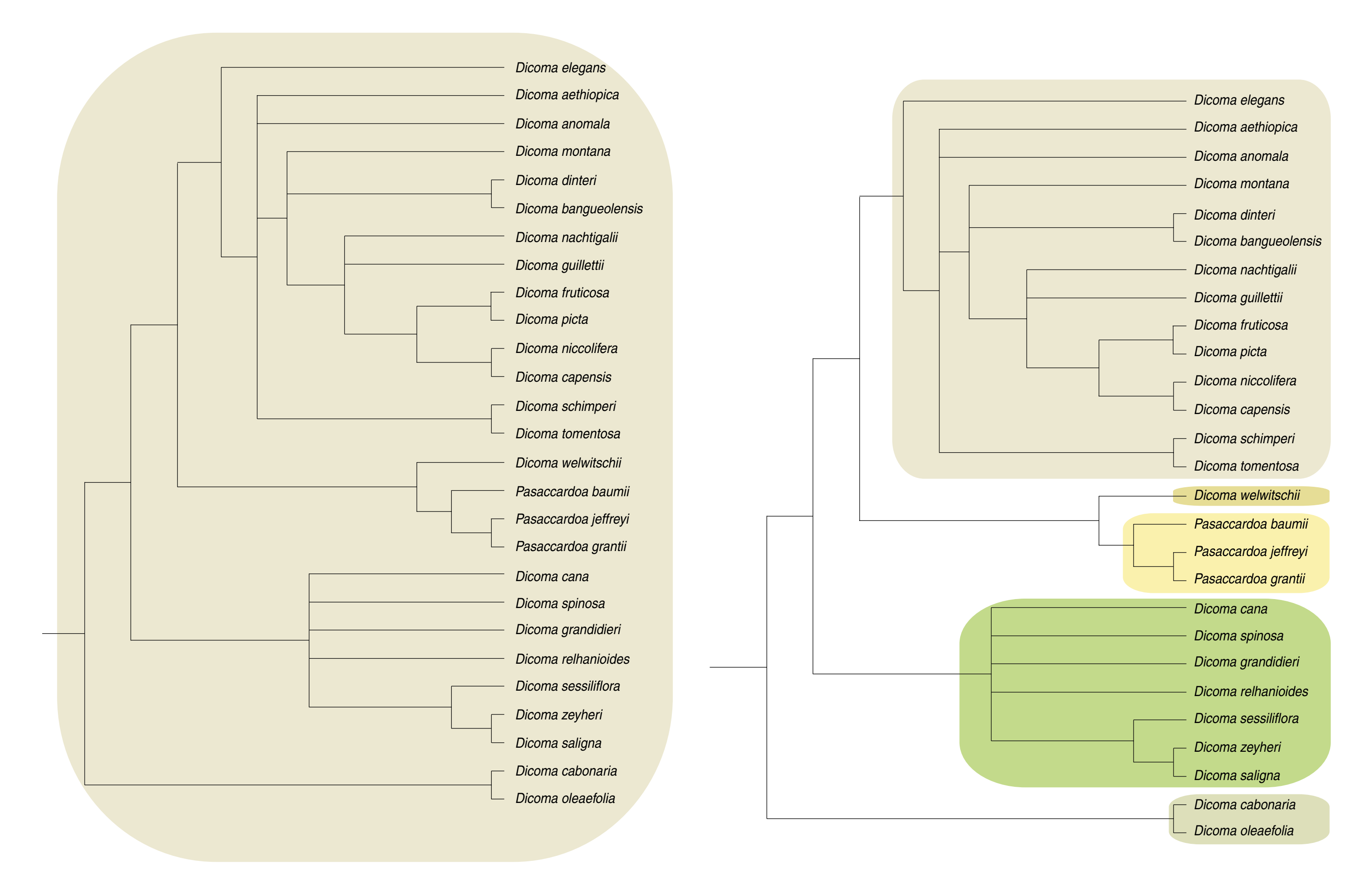
En toda clasificación, el género ocupa un lugar peculiar. Por su proximidad con la especie, conserva todavía bastante relación con la realidad natural. En los inicios de la botánica, pensemos en Teofrasto, por ejemplo, los límites entre género y especie eran bastante difusos. Por esa razón, todavía en los albores de la denominación binomial linneana el nombre genérico, a menudo, remitía a grupos con los que estaban familiarizados incluso los ajenos al campo profesional de la botánica.

Según su definición tradicional un género abarca una serie de especies más próximas entre sí que con cualquier otra especie de un género distinto. Las especies que lo conforman no tienen relaciones de tipo biológico entre ellas, si exceptuamos las de tipo evolutivo. Por lo tanto, un género sólo encerrará sentido biológico si conforma una unidad evolutiva.

En el marco de la sistemática filogenética o cladística, predominante en la actualidad, importan los grupos de organismos que son monofiléticos, es decir, los que abarcan un determinado antecesor y todos y cada uno de sus descendientes (que representan así una "línea evolutiva" coherente). Se oponen a los grupos parafiléticos o polifiléticos, que se consideran incoherentes y, por ende, rechazables desde el punto de vista sistemático.

La familia de las compuestas, o Asteraceae, es la más avanzada de las angiospermas. No existe acuerdo sobre los géneros que la integran. Una controversia que viene de lejos. En el siglo XIX, la escuela de Cassini, que seguía un criterio analítico respecto a la delimitación de los géneros, se enfrentaba a la de Bentham, que, con una perspectiva más sintética, reconocía en su seno un número mucho menor de géneros. Esta polémica ha persistido hasta nuestros días. Atañe, sobre todo, a determinados géneros que abarcan un gran número de especies: *Senecio* L., *Eupatorium* L. y *Vernonia* Schreb. En el caso de *Eupatorium* se han descrito en los últimos años cerca de 100 nuevos géneros. Tal multiplicidad ha venido instada por el estudio de ciertos caracteres morfológicos de tipo microscópico.

Pero buena parte de la polémica alimentada por el enfrentamiento entre diferentes propuestas subjetivas, sin una base científica sólida, se soluciona en parte si nos basamos en información de tipo filogenético. Sea, por ejemplo, el género *Dicoma* Cass., de la tribu Mutisieae, conformada tradicionalmente por más de 50 especies distribuidas mayoritariamente por Africa tropical. De acuerdo con Bremer dicho género forma parte del "grupo *Dicoma*", que abarcaría, además de *Dicoma*, otros 5 géneros próximos.



2. Dos posibles soluciones para evitar el carácter parafilético del género Dicoma*: transferir las especies de* Pasaccardoa *al género* Dicoma *y dividir* Dicoma *en varios grupos monofiléticos de forma que* Pasaccardoa *seguiría siendo un género independiente*

El análisis filogenético de dicho grupo nos ha demostrado que el género *Dicoma* se distingue con nitidez del resto. Ahora bien, se observa que las especies del género *Pasaccardoa* Kuntze se agrupan en un clado situado entre las especies de *Dicoma*. ¿Qué significa eso? Que si nos atuviéramos a los límites tradicionales, *Dicoma* sería parafilético. Para salir de esta paradoja y considerar únicamente grupos monofiléticos caben dos soluciones. Primera, transferir las especies de *Pasaccardoa* al género *Dicoma*, de forma que el género constituido por las especies de *Dicoma* y *Pasaccardoa* sea monofilético; segunda, dividir *Dicoma* en varios grupos monofiléticos, de suerte que *Pasaccardoa* seguiría siendo un género independiente.

Debido a la enorme heterogeneidad de *Dicoma*, en la que existen varios grupos monofiléticos caracterizados por gran cantidad de sinapomorfías (caracteres avanzados comunes a los miembros de dichos grupos) y a que el género *Pasaccardoa* está bien caracterizado frente a los distintos grupos de especies presentes en *Dicoma*, optamos por la segunda posibilidad. Se reconocieron cinco géneros: *Cloiselia* S. Moore, *Macledium* Cass., *Dicomopsis* gen. nov., *Pasaccardoa* Kuntze y el género *Dicoma* en sentido estricto que engloba a la especie tipo de dicho género, *D. tomentosa* Cass.

SANTIAGO ORTIZ
Laboratorio de Botánica,
Facultad de Farmacia, Universidad
de Santiago
de Compostela

¿Cómo vemos?

Plasticidad de la corteza estriada

En la corteza cerebral se generan las sensaciones. De ella parten las órdenes necesarias para la ejecución de los actos voluntarios. Las sensaciones se procesan en distintas áreas de la corteza: auditiva, visual, motora, etcétera. Incluso para un único sentido, por ejemplo el de la vista, nos encontramos con 30 zonas o áreas cerebrales implicadas en aspectos particulares de su procesamiento.

Una vez que la información visual llega a la corteza visual primaria (V1, o corteza estriada), se "redistribuye" hacia otras áreas, donde se analizan por separado los diferentes atributos de la imagen (color, forma, movimiento, posición, etc.), antes de volver a unirse para darnos la percepción final. Esta imagen final no siempre se corresponde con la realidad,

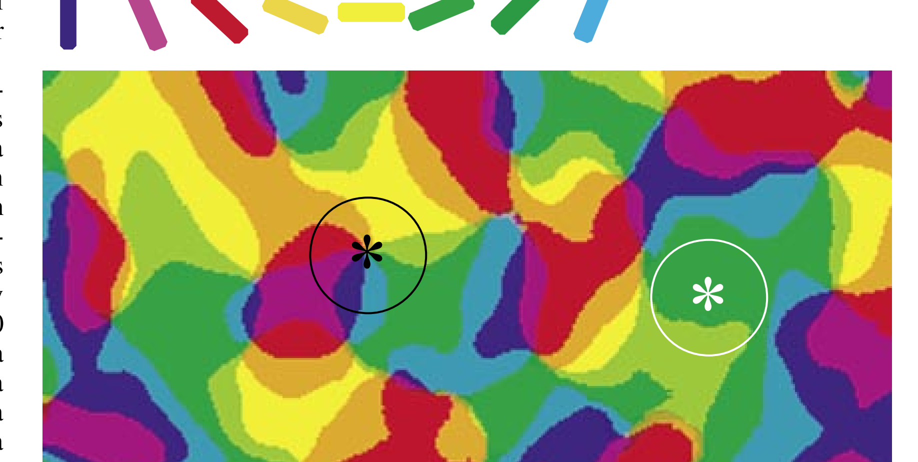
sino que viene influenciada por el contexto en el que se localice y por nuestra experiencia previa.

Desde una óptica clásica se consideraba que, en los primeros centros de procesamiento (corteza estriada incluida), las neuronas presentaban ciertas propiedades, adquiridas en la etapa de desarrollo del individuo (período crítico), inmutables en el estado adulto. David Hubel y Torsten Wiesel demostraron en 1970 que el equilibrio en la influencia de cada ojo sobre las células de la corteza visual se modificaba de una manera evidente si eliminábamos la información que llega desde uno de los ojos tan sólo unos días. Las células de la corteza visual pasaban a ser "dominadas" totalmente por el ojo que permanecía abierto. Este efecto era reversible si eliminábamos a continuación la información que llegaba a través del ojo dominante. Tales modificaciones se implantaban cuando se realizaban durante el período crítico (8 primeras semanas de vida en primates).

A pesar de esta demostración de que ciertas propiedades se establecían durante la etapa de desarrollo y permanecían inmutables en adelante, la investigación posterior demostró que las células de la corteza cerebral adulta son plásticas en muchas de sus propiedades.

Lo que determina en última instancia la capacidad de cambio de las neuronas son las conexiones que recibe de otras neuronas con propiedades diferentes. Por ejemplo, si tapamos el campo receptor de una célula nerviosa de la corteza visual (la zona del campo visual que la célula ve), al cabo de unos minutos la neurona estará respondiendo a estímulos situados fuera de su campo receptor, ante la falta de información procedente de éste. Lo que se explica porque a nuestra célula le llega información procedente de otras que ven zonas del campo visual distintas. ¿Por qué no es evidente en condiciones normales esa información y sale a relucir en cuanto modificamos tales condiciones? Lo ignoramos.

Quizá la propiedad más estudiada de la corteza visual sea la selectividad a la orientación del estímulo. Cada neurona de V1 responde a barras de luz que se mueven con diferentes orientaciones. Las células que presentan una misma orientación preferente se agrupan en dominios de orientación. En algunas células (alrededor de un 30 %) puede alterarse dicha selectividad. Si obligamos a la neurona a que responda a estímulos con orientación distinta de la óptima, las células terminarán modificando su selectividad inicial. Pero no se ha podido demostrar qué diferencia existía entre esas células y aquellas en las que la selectividad no era modificable.



Mapa de orientación de V1. Foto coloreada en la que se indica la selectividad a la orientación de cada zona de la corteza en función de un código de colores. La orientación que representa cada color está indicada por las barras en la parte superior. El que una zona sea azul indica que todas las células en esa área tienen selectividad a estímulos verticales

Si retomamos la idea de que las células sólo podrán responder a los estímulos de los que reciben información, y sabemos que las células contactan de forma prioritaria con las neuronas inmediatas (en un radio de 0,5 mm), nos resultará fácil comprobar, mirando la figura, que las células situadas en el centro de un dominio (asterisco blanco) están rodeadas de células con su misma selectividad a la orientación (el círculo blanco incluye un solo color); en consecuencia, debería ser más difícil alterar esta preferencia.

Por el contrario, las neuronas situadas en la confluencia de varios dominios (asterisco negro) están rodeadas de otras con diferente preferencia (el círculo negro incluye zonas de todos los colores); en consecuencia, su respuesta debería ser más fácil de modificar.

Y eso es lo que hemos demostrado en un experimento reciente. La localización de una célula en una u otra zona de la corteza determinará su capacidad de modificar la respuesta emitida. Las neuronas situadas en las zonas de confluencia de varios dominios modifican su respuesta en función del estímulo que les ha sido presentado previamente. En cambio, las neuronas situadas en el centro de los dominios responden independientemente de lo que haya pasado antes.

Este último descubrimiento tiene implicaciones importantes para entender nuestro proceso normal de visión. Movemos los ojos sin cesar; las escenas se suceden de una manera continua, no independiente. Lo que vemos ahora influye en lo que veremos unos instantes mas tarde. Esta influencia vendría determinada por zonas específicas de la corteza, permitiendo así una visión dinámica del mundo. Abre, además, la puerta a que otras propiedades de las células corticales, como la dominancia ocular o la selectividad a la frecuencia espacial, presenten un tipo similar de plasticidad dependiente de su localización.

CASTO RIVADULLA
Grupo de Neurociencia y Control Motor, Dpto. de Medicina, Universidad de La Coruña

Texto y fotos: Esther Garcés y Mercedes M. Agustina

Microorganismos que se dejan ver

2. Playa de La Fosca, agosto de 2001. Las concentraciones de **Alexandrium taylori** *bajaron por debajo de miles de células por litro. Las manchas de coloración no se distinguen ya a simple vista*

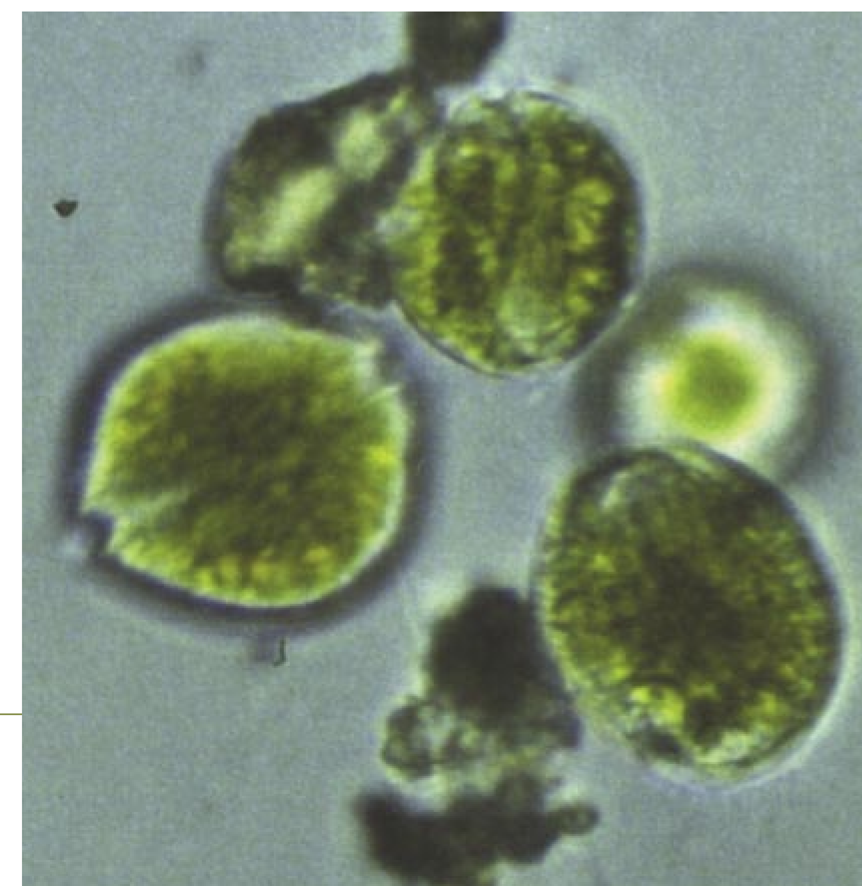
1. Playa de La Fosca (Costa Brava, España), julio de 2001 (izquierda). Las concentraciones de millones de células por litro de **Alexandrium taylori** *permiten la visibilidad directa de algas microscópicas*



3. Playa de Pals (Costa Brava, España). Hasta el verano del año 2001, las proliferaciones de **A. taylori** *se hallaban confinadas en determinados lugares. En julio de 2001 se produjo una proliferación inusual por su extensión. Las fotografías 1, 2 y 3 se han obtenido de las actuaciones de vigilancia aérea de la Agencia Catalana del Agua durante el verano de 2001*

Desde los años ochenta, se viene observando una curiosa transformación en ciertas playas del noreste de la península Ibérica y las islas Baleares. La transparencia típica de las aguas desaparece, dependiendo del año, entre julio y agosto, meses de vacación estival. Hasta 1995 no se identificó el agente del fenómeno. Se trata de la proliferación de *Alexandrium taylori*, microalga dinoflagelada, que puede alcanzar mas de un millón de células por litro, lo que provoca el cambio de coloración del agua.

¿Cómo alcanza tales densidades? Aunque el dinoflagelado tiene un crecimiento vegetativo moderado, desarrolla un ciclo biológico y un comportamiento que ayudan al mantenimiento de la población, a través de la migración, por ejemplo. A primeras horas de la mañana el agua es transparente, pero conforme avanza el día adquiere la coloración verdosa debida a la migración del organismo hacia la superficie. [El estudio de estas proliferaciones es uno de los objetivos del proyecto Europeo STRATEGY (EVK3-2001-00046.)]

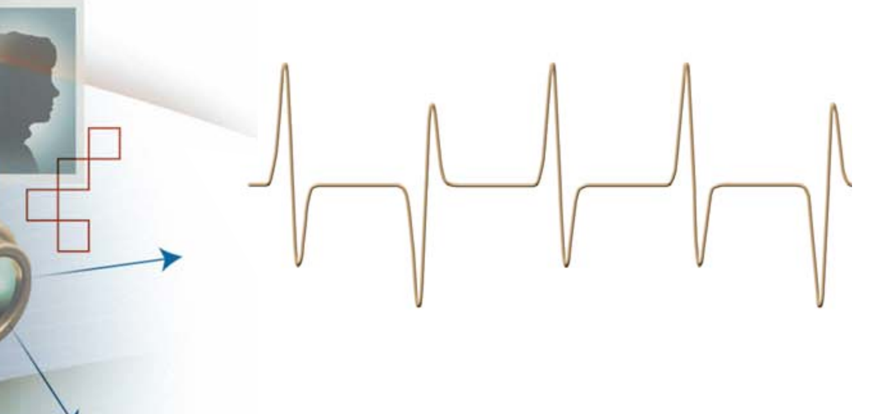


4. Célula vegetativa de **Alexandrium taylori**, *un dinoflagelado (un eucariota en la división botánica de los* **Pyrrhophyta**) *que se describió en 1994 en el Atlántico con distribución desconocida. El dinoflagelado mide unas 30 micras de longitud*



NETWORK
RADIO FREQUENCY
GIGAHERTZ
ULTRAWIDEBAND
DATA
WIRELESS
TRANSMISSION
Connecting...
TALK
END
SCHEDULE

Emisores inalámbricos de datos



La más antigua de las técnicas de radio ofrece un nuevo modo de transmitir con rapidez y sin cables gran cantidad de datos desde equipos portátiles

David G. Leeper

En un aula apenas iluminada, intensas descargas blanquiazules saltan, crepitando, entre los extremos de las dos barras metálicas de un transmisor de chispa; Heinrich Hertz está generando con él ondas de radio ante sus alumnos de Karlsruhe. Siete años después, en 1894, un joven italiano de vacaciones en los Alpes, Guglielmo Marconi, lee un artículo de Hertz. Corre a casa; lleva en la cabeza la idea de la telegrafía sin hilos. Poco después, los transmisores de chispa que construye envían señales de código Morse a través de su laboratorio sin necesidad de hilo alguno. Logrará en 1901 transmitir señales codificadas de un lado al otro del océano Atlántico merced a potencias más elevadas y antenas mucho mayores.

TOM WHITE IMAGES

Pasado un siglo, se vuelve a ensayar en los laboratorios la transmisión de breves impulsos electromagnéticos. Pero la técnica ha cambiado mucho; los diminutos circuitos integrados y los diodos túnel han reemplazado a las enormes bobinas y condensadores de Hertz. De modo análogo, los erráticos y desiguales chorros de chispas que emitían los primitivos transmisores se han refinado hasta convertirse en secuencias, perfectamente medidas, de impulsos conformados de manera precisa que sólo duran unos cientos de billonésimas de segundo. Los equipos de Marconi transmitían a un ritmo aproximado de 10 bits de datos por segundo; los sistemas inalámbricos de banda ultraancha (*ultra wide band*, UWB) —dispositivos de corto alcance y baja potencia, los herederos actuales de los transmisores de chispa originales— envían en ese mismo tiempo más de 100 millones de bits de información digital.

Basta con llegar a la pared

Los sistemas de UWB transfieren datos a alta velocidad; diversos inventores y empresarios han visto en esta técnica para la transmisión inalámbrica de corto alcance un medio casi ideal de encauzar los torrentes de información que circulan por las redes de equipos electrónicos portátiles (alimentados por baterías). Interconectaría asistentes digitales personales, cámaras fotográficas y de vídeo digitales, reproductores de sonido e imagen, teléfonos celulares, ordenadores portátiles y otros equipos electrónicos móviles. La intercomunicación de estos dispositivos requiere enlaces inalámbricos de gran anchura de banda que transmitan los voluminosos ficheros digitales asociados a unas aplicaciones en banda ancha cada vez más complejas.

Otro acicate de la técnica de la UWB es la proliferación de conexiones por hilo a Internet. En el mundo desarrollado muchos son los que pasan casi todo el día a menos de diez metros de algún enlace por cable a la Red; esta proximidad ofrece la posibilidad de utilizar una comunicación inalámbrica de corta distancia entre los dispositivos electrónicos portátiles e Internet. De ahí que la industria haya respondido con el desarrollo de técnicas de banda estrecha que "llegan al conector de la pared": los estándares IEEE 802.11b y Bluetooth, aplicados a la banda de frecuencias de 2,400 a 2,483 GHz, no sujeta a licencia, y el IEEE 802.11a, que funciona en espacios interiores a frecuencias comprendidas entre 5,150 y 5,350 GHz.

Bluetooth es el estándar más conocido para las redes de área personal (PAN) inalámbricas, concebidas para sustituir a los cables (físicos) en serie y del tipo USB (bus en serie universal) con los que se transmiten datos entre equipos electrónicos muy próximos. Aunque haya diferencias de unas realizaciones concretas a otras, la norma Bluetooth debe proporcionar una velocidad de transmisión máxima en torno a los 700 kilobit por segundo en distancias de hasta 10 metros.

Los estándares IEEE 802.11a y 802.11b se pensaron para redes de área local (LAN) inalámbricas, en las que priman las velocidades altas y distancias más largas pero se exige un consumo de potencia mayor. En su versión típica, una LAN inalámbrica ofrece enlaces entre ordenadores portátiles y una LAN de cable a través de puntos de acceso. Los usuarios del IEEE 802.11b pueden esperar velocidades de transmisión máximas del orden de 5,5 megabit por segundo (Mbit/s) en distancias de hasta 100 metros en espacio abierto. El estándar afín IEEE 802.11a permitirá transmitir datos a velocidades máximas entre 24 y 35 Mbit/s hasta a unos 50 metros en espacio abierto. En la práctica, todos los sistemas radioeléctricos de corto alcance "rebajan" su velocidad para compensar el efecto de trayectos largos, paredes, personas u otros obstáculos.

Hoy día, parece que los transceptores de UWB de semiconductores podrán funcionar a velocidades de transmisión muy elevadas —de 100 a 500 Mbit/s— en distancias de cinco a diez metros. Unas velocidades de transmisión binaria tan altas darán origen a aplicaciones inimaginables con los estándares inalámbricos actuales. Y por si fuera poco, los técnicos esperan conseguir unidades de UWB más pequeñas y económicas, y de menor consumo, que los dispositivos radioeléctricos de banda estrecha existentes.

Hay otro aspecto en que el sistema de UWB aventaja a otros inalámbricos de corto alcance. La creciente demanda de mayor capacidad de transmisión de datos por radio y la congestión del espectro de radiofrecuencias reglamentado juegan a favor de los sistemas que, además de ofrecer altas velocidades de transmisión de bits, las concentran en espacios físicos más reducidos. Cuantifica esta característica un parámetro, la "capacidad espacial". Se mide en bits por segundo por metro cuadrado; es una manera de calibrar la "intensidad de datos" comparable a los lúmenes por metro cuadrado que expresan la intensidad de iluminación de un foco de luz. Al congregarse cada vez en mayor número usuarios de banda ancha en espacios abarrotados, aeropuertos, hoteles, salas de conferencias y oficinas, el parámetro más importante de un sistema inalámbrico será su capacidad espacial; ahí sobresale la técnica de UWB (*véase la ilustración*).

Las técnicas inalámbricas de UWB deberían dar lugar a una clase enteramente nueva de dispositivos y funciones electrónicas que cambiarían nuestro modo de vida. Por ejemplo, en vez de ir a una tienda por una película grabada se podría descargarla mientras se

QUIENES DESARROLLAN LA UWB

Aether Wire & Location	www.aetherwire.com
General Atomics	www.ga.com
Multispectral Solutions	www.multispectral.com
Pulse-Link	www.pulse-link.net
Pulsicom Technologies (Israel)	www.pulsicom.com
Time Domain	www.timedomain.com
XtremeSpectrum	www.xtremespectrum.com
Zircon	www.zircon.com

reposta en una gasolinera; se emplearía una unidad portátil de almacenamiento masivo con transmisión de UWB. Con la UWB se sincronizarían en un momento los abultados directorios de correo electrónico y agendas de distintos asistentes digitales personales, o se enviarían y recibirían mensajes en lugares públicos. De viaje en aviones o trenes, disfrutaríamos de películas o de juegos de vídeo interactivos mediante gafas de visión tridimensional y equipos de sonido de alta fidelidad provistos de UWB. Los entusiastas de la fotografía descargarían imágenes y vídeo digitales desde sus cámaras al ordenador o televisor doméstico; se suprimiría la maraña de cables de hoy.

La técnica de la UWB tiene otras aplicaciones destacadas fuera de las comunicaciones. Los impulsos en que se basa, muy estrechos, de gran precisión temporal, se asemejan a los utilizados en los radares. Le es así posible localizar objetos enterrados o detectar movimientos a través de las paredes; resultaría muy útil en misiones de salvamento o vigilancia policial.

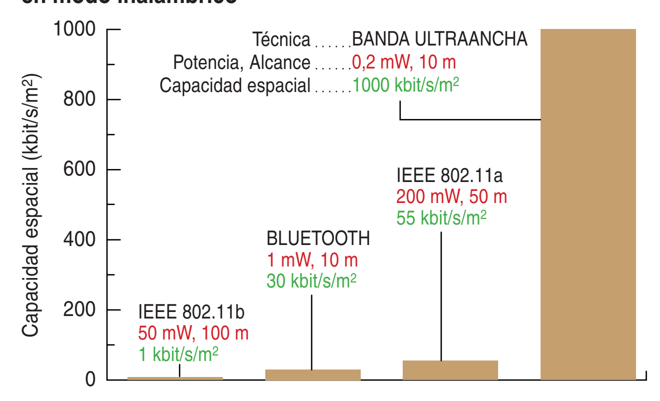
Los exactos impulsos de la UWB sirven también para determinar la posición de un emisor en el interior de un edificio. Un sistema de UWB inalámbrico —actuando como una versión local del sistema mundial de posicionamiento (GPS) o del sistema de antirrobo de automóviles LoJack y contando con la mediación de múltiples receptores situados en los alrededores— triangularía las posiciones de unas mercancías etiquetadas con transmisores; sería de gran ayuda para mantener en unos grandes almacenes unos “inventarios virtuales” (seguir, por ejemplo, la pista de productos de alto valor en los estantes o en el almacén). Cabría además aplicar esta capacidad localizadora a reforzar la seguridad: unas cerraduras “inteligentes” o unos cajeros automáticos dotados de receptores de UWB se accionarían sólo cuando un usuario autorizado —provisto de un transmisor UWB— se aproximase a menos de un metro.

La radio sin onda portadora

La transmisión inalámbrica en banda ultraancha no se parece a otras formas familiares de radiocomunicaciones, como las de AM/FM, onda corta, policía o bomberos, radiodifusión, televisión, etcétera. Estos servicios de banda estrecha, confinados en los límites de las bandas de frecuencias que les han sido asignados, se valen de una “onda portadora”. Las señales de un mensaje de datos se transmiten modulando la amplitud, frecuencia o fase de esa onda portadora fundamental; luego se las recupera en la recepción (*véase el recuadro* “Caracteres técnicos de las señales de radio”).

En UWB el proceso es muy distinto: las emisiones no emplean una onda portadora, sino que se componen de una serie de impulsos intermitentes. Las variaciones de la separación en el tiempo, de la amplitud o de la polaridad de estos impulsos codificarán informaciones que transmitirá el tren de datos. La transmisión de UWB recibe también otras denominaciones: sin portadora, en banda base, no sinusoidal y de impulsos, entre otras.

Comparación de capacidades espaciales a corta distancia en modo inalámbrico



LA CAPACIDAD ESPACIAL, una medida importante de la eficacia operativa cuando se comparan sistemas inalámbricos de corta distancia, favorece a la técnica de UWB. Este parámetro (expresado en kilobit por segundo por metro cuadrado, kbit/s/m^2) no indica sólo la velocidad binaria de transferencia de datos, sino también las velocidades disponibles en los limitados espacios definidos por el corto alcance de la transmisión.

Evitar la interferencia

A causa de su suma brevedad, los impulsos de la banda ultraancha operan en una banda de frecuencias continua que abarca varios gigahertz: cuanto más breve sea el impulso, más ancho será el espectro de frecuencias que ocupe (*fenómeno explicado en el recuadro* “Caracteres técnicos de las señales de radio”).

Dado que los impulsos de UWB emplean las mismas frecuencias que los servicios de radio tradicionales, hay posibilidad de interferencia. Los transmisores de chispa de Marconi, que tenían que salvar grandes distancias, funcionaban a elevadas potencias; hoy serían inadmisibles porque interferirían casi toda señal transmitida. Los sistemas de comunicación en banda ultraancha presentarían el mismo problema si no fuera porque funcionan, es una elección deliberada, a niveles de potencia muy bajos; emiten menos energía radioeléctrica que los secadores de pelo, taladradoras, ordenadores portátiles y demás utensilios domésticos que radian energía electromagnética como subproducto. Su débil potencia de salida determina una reducción radical del alcance en UWB, hasta distancias inferiores a 100 metros; muy a menudo, no pasa de 10 metros. Con esquemas de modulación bien elegidos, las interferencias de la UWB suelen resultar inofensivas, pues el nivel de energía de los impulsos es demasiado bajo para crear problemas.

Se espera que la potencia media radiada por los transceptores de UWB será, tal y como sucede con los electrodomésticos, demasiado baja para ocasionar algún riesgo biológico a los usuarios, si bien se necesitan más pruebas de laboratorio para confirmarlo plenamente. Un transmisor de UWB típico, de 200 microwatt, radia sólo un tercio de milésima de la energía media que un teléfono celular ordinario de 600 miliwatt.

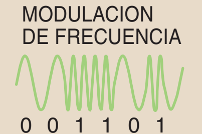
CARACTERES TECNICOS DE LAS SEÑALES DE RADIO

Esquemas de modulación en banda estrecha y banda ancha

Las técnicas radioeléctricas ordinarias en banda estrecha consisten en modificar (modular) una onda "portadora" base de tal manera que incorpore un tren de bits de datos codificados. Para ello se alteran su amplitud, frecuencia o fase.

La técnica radioeléctrica de transmisión en banda ultraancha no utiliza portadora alguna, sino que modula de una u otra forma los impulsos individuales. En la modulación dipolar, el "1" digital se representa por un impulso positivo (ascendente) y el "0" por un impulso invertido (descendente). En la modulación de la amplitud, los impulsos de amplitud completa representan "1" y los de amplitud mitad "0". En la modulación de la posición, se envían impulsos idénticos, pero se altera su colocación en el tiempo; los impulsos retardados indican "0".

Transmisiones en banda estrecha







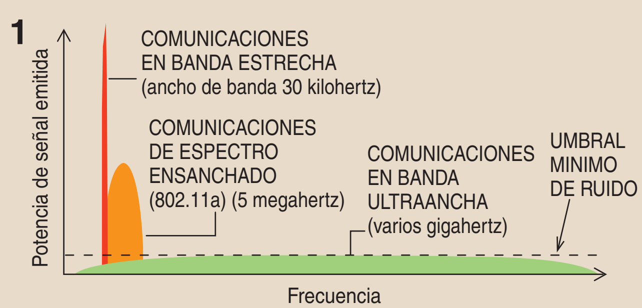
Transmisiones en banda ancha



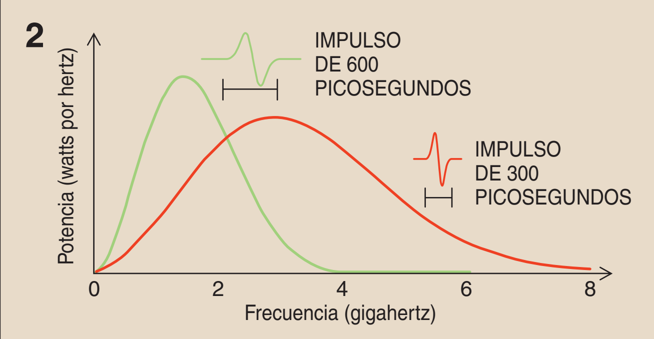


Por qué los impulsos breves ocupan bandas de frecuencias amplias

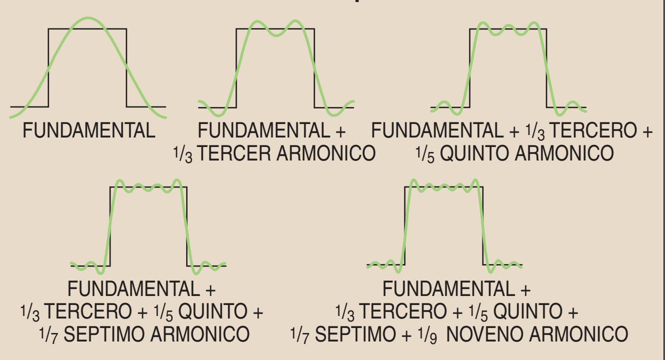
A diferencia de los sistemas de comunicaciones tradicionales, los inalámbricos en banda ultraancha ocupan una banda de frecuencias muy amplia a niveles de potencia muy reducidos, a menudo inferiores al umbral mínimo de ruido del entorno de señales existente (*1*).



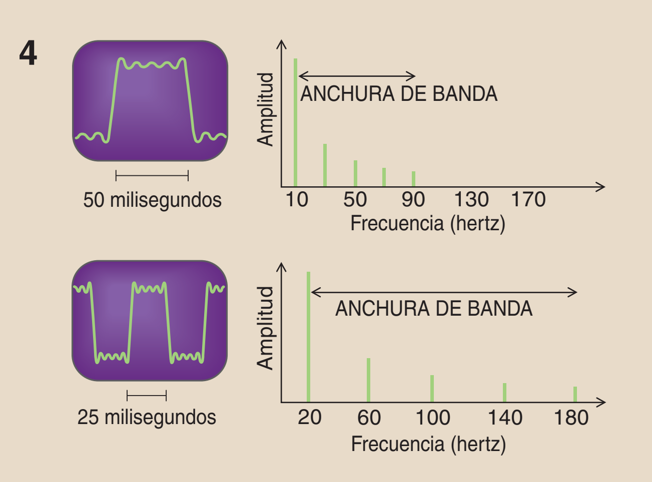
En el siguiente gráfico (*2*) se representan impulsos característicos de banda ultraancha y los espectros de frecuencias que les corresponden. Puede apreciarse que, cuanto más se estrecha en el tiempo el impulso, más elevada es su frecuencia central y más se ensancha su espectro de frecuencias. (Los picosegundos son billonésimas de segundo.)



La transformación de Fourier explica por qué cuanto menor es la duración de un impulso mayor es la anchura de banda que ocupa en el espectro. Esta teoría sostiene que cualquier onda, sea cual sea su forma, puede representarse por una suma, con los pesos adecuados para cada término, de ondas sinusoidales. Por ejemplo, un impulso cuadrado (en realidad, un tren de ellos) equivale a la suma de una onda fundamental más otras cuyas frecuencias son múltiplos impares (armónicos) de la frecuencia fundamental. Cada armónico añadido es de menor amplitud que el precedente, pero mejora la aproximación a la onda analizada. La reproducción exacta de la onda cuadrada requiere un número infinito de armónicos, si bien, en la práctica (*3*), la onda fundamental más los cuatro primeros armónicos impares ya da una representación satisfactoria.



Las siguientes figuras (*4*) ilustran la distribución de energía, según el análisis de Fourier, entre la onda fundamental y los armónicos para dos impulsos. Adviértase que el impulso más estrecho se representa por una frecuencia fundamental más alta; los cuatro armónicos añadidos se extienden más en el espectro (mayor anchura de banda) que los del impulso más ancho.



JOHNNY JOHNSON

El autor

DAVID G. LEEPER es el director de técnicas inalámbricas del Grupo de Inversiones en Nuevas Actividades de Intel, que explora las aplicaciones comerciales de los sistemas inalámbricos en banda ultraancha. Durante sus 32 años de carrera, ha desempeñado también funciones directivas en los Laboratorios Bell de AT&T, en Bellcore y en Motorola. Es doctor en ingeniería eléctrica por la Universidad de Pennsylvania.

El pasado 14 de febrero la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de Estados Unidos dio su aprobación, no sin restricciones, al uso de la técnica UWB, tras casi dos años de análisis por las partes interesadas. La mayoría de los más de 900 comentarios remitidos sobre la reglamentación propuesta se referían a las interferencias que pudiera causar la UWB en servicios ya existentes, como el GPS, el radar, las comunicaciones militares y la telefonía celular.

Con una postura conservadora, los organismos federales decidieron permitir las aplicaciones de las comunicaciones UWB fijando límites estrictos de la potencia de la "radiación incidental" total entre 3,1 y 10,6 GHz. Fuera de esa banda, las señales deben atenuarse en 12 decibelios (dB), 34 en las regiones próximas a las bandas de frecuencias del GPS. Se admitieron restricciones más liberales para los miembros de la policía y la protección civil que utilicen equipos de UWB para localizar víctimas de terremotos o de ataques terroristas.

Pese a las limitaciones, hay confianza en que la técnica inalámbrica de UWB realizará la mayoría de las operaciones de transferencia de datos imaginadas. La FCC manifestó su disposición a suavizar las restricciones una vez se cuente con más experiencia.

Tiene su gracia que el mayor problema técnico sea cómo proteger los dispositivos de UWB de las interferencias de otros emisores. En este aspecto los sistemas de banda estrecha presentan una clara ventaja: están equipados con un filtro de entrada para que no los perturben los transmisores que operan fuera de sus bandas de recepción. Por desgracia, un receptor de UWB ha de tener un filtro de entrada poco selectivo, que deje pasar un ancho espectro de frecuencias, incluso señales de las posibles fuentes de interferencia. La capacidad del receptor de UWB de superar este obstáculo, su "resistencia a las interferencias", es el atributo esencial de un buen diseño. Un modo de mejorarla consiste en instalar los llamados filtros de ranura, que atenúan partes estrechas del espectro donde se sabe que hay mayor probabilidad de interferencia. Otra medida protectora desarrollada es el uso de filtros de ranura automáticos, capaces de buscar y atenuar interferencias de especial intensidad procedentes de fuentes de banda estrecha.

Muchos caminos a seguir

También ha de tomarse en cuenta la interferencia debida a la propagación por varios trayectos. En ciertos casos, una misma señal de banda estrecha se refleja en los objetos cercanos y desdobla luego en dos o más trayectos distintos, de tal modo que las señales reflejadas llegan desfasadas al receptor y a veces casi se anulan mutuamente. Quién no ha padecido los efectos de la propagación multitrayecto mientras escuchaba la FM en el coche. Al parar en un semáforo, por ejemplo, puede que la señal sufra de pronto ruidos y distorsiones, pero si se avanza medio metro más la temporización relativa de las señales recibidas quizás varíe lo suficiente para restaurar una recepción clara.

La multiplicidad de señales causada por las reflexiones podría también penalizar a los equipos de UWB inalámbricos, pero gracias a un diseño inteligente se saca provecho del fenómeno. Al ser tan estrechos los impulsos, hay receptores de UWB que pueden separar los trenes de señales que llegan por distintos trayectos y sintonizar con múltiples "brazos" las diversas señales reflejadas. A continuación, esos brazos deciden por "votación", casi en tiempo real, si el valor de cada bit recibido es "uno" o "cero". Esta función de verificación binaria mejora incluso el comportamiento del receptor.

Cerca y a poca potencia

La actual tendencia a transmitir señales de baja potencia a distancias más cortas no es nueva en las comunicaciones inalámbricas; se remonta a los comienzos de la radiotelefonía. Antes de 1980, una sola torre equipada con un transmisor de elevada potencia cubría una ciudad entera, pero el limitado espectro disponible no permitía atender a un gran número de clientes. Todavía en 1976, el servicio de radioteléfono de Nueva York sólo podía servir a 545 abonados a la vez; hoy parece irrisorio. La telefonía celular admitió un número de abonados mucho mayor al reducir drásticamente la potencia y la distancia; así era posible la utilización reiterada de la misma porción del espectro dentro de una misma zona geográfica. La técnica inalámbrica de corto alcance, y en particular la UWB, se dispone hoy a conseguirlo también.

Todavía hay quienes recuerdan tiempos anteriores a 1920, cuando reinaban los transmisores de chispa. Con ayuda de los semiconductores y de Internet, la técnica de la banda ultraancha, heredera de aquellos primitivos artilugios, quizá se convierta pronto en un componente inalámbrico esencial para las comunicaciones de datos a alta velocidad.

Bibliografía complementaria

ULTRA-WIDEBAND TECHNOLOGY FOR SHORT OR MEDIUM-RANGE WIRELESS COMMUNICATIONS. J. Foerster y otros en *Intel Technology Journal*, febrero de 2001.

A LONG-TERM VIEW OF SHORT-RANGE WIRELESS. David G. Leeper en *IEEE Computer Magazine*, vol. 34, n.º 6, págs. 39-44; junio de 2001.

Viaje al planeta más lejano

Plutón, durante largo tiempo considerado el más lejano de los planetas, es el primero de los astros helados que gravitan en la noche perpetua de los confines del sistema solar. ¿Recibirá, por fin, la visita de una sonda espacial?

S. Alan Stern





1. **EL PAISAJE DE PLUTON** no se percibe bien desde la Tierra. En esta elaboración artística se recogen las conjeturas mejor fundadas de su posible naturaleza. Se cree que la superficie de Plutón está compuesta de hielos de nitrógeno, monóxido de carbono, metano y agua. Parece que una parte de este material se sublima y genera una atmósfera rarificada cuando el planeta se encuentra en la parte de su órbita más cercana al Sol. De vez en cuando, los géiseres entran en erupción y proyectan penachos de gas y hielo varios kilómetros por encima de la superficie. Se distingue en el cielo la silueta de Caronte, el satélite de Plutón.

EDWIN FAUGHN

Apenas diez años atrás, los astrónomos consideraban todavía a Plutón una rareza singular. Los demás planetas encajaban bien en la arquitectura del sistema solar: en el interior, cerca del Sol, circulan cuatro cuerpos rocosos y pequeños (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte); en el exterior, más allá del cinturón de asteroides, se hallan cuatro gigantes gaseosos (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno). Los ocho planetas describen órbitas casi circulares en torno al Sol en un mismo plano, llamado plano de la eclíptica. Plutón constituye también un planeta exterior, aunque minúsculo (de unos 2400 kilómetros de diámetro), helado; dibuja una órbita más elíptica y está inclinado unos 17 grados sobre el plano de la eclíptica. En breve, parece un núcleo cometario gigante más que un planeta en sentido estricto.

En los años cuarenta del siglo pasado, Gerard Kuiper, astrónomo de origen holandés, postuló que Plutón quizá no fuera un objeto aislado, sino el más brillante de un grupo de cuerpos helados en órbita por la periferia del sistema solar. No tardó en aceptarse la tesis de un "cinturón de Kuiper", que explicaba por qué los numerosos cometas de período corto (de menos de doscientos años) recorren órbitas muy próximas al plano de la eclíptica. Sin embargo, pese a la acumulación de indicios a favor de la existencia de ese reservorio lejano de cometas situados en la misma región que Plutón, no pudo observarse ningún astro "transneptuniano" durante medio siglo. A finales del decenio de 1980 comenzó a instalarse, en los telescopios, detectores cuya sensibilidad superaba de lejos la de las viejas placas fotográficas: dispositivos acoplados de carga (CCD). De esa innovación técnica vendría el éxito.

En 1992 se descubrió en el Observatorio Mauna Kea de Hawai el primer objeto del cinturón de Kuiper (OCK). Era unas diez veces más pequeño y casi diez mil veces más débil que Plutón [*véase* "El cinturón de Kuiper", por Jane X. Luu y David C. Jewitt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 1996]. Desde entonces se han encontrado más de 600 cuerpos parecidos, cuyos diámetros abarcan desde los 50 a casi los 1200 kilómetros.

Y eso representa sólo la punta del iceberg. Mediante extrapolaciones realizadas a partir de la pequeña fracción del cielo que se ha explorado hasta ahora, se calcula que el cinturón de Kuiper contiene alrededor de 100.000 objetos con un diámetro superior a los 100 kilómetros. Por eso, si bien el cinturón de Kuiper pudiera evocarnos el cinturón de asteroides, es mucho más vasto: aloja una cantidad muy superior de materia y un número mucho más alto de objetos (en particular los de gran tamaño). En cambio los objetos de Kuiper son menos rocosos que los asteroides y encierran hielo en abundancia (agua helada, hielo de dióxido de carbono y metano helado), así como material orgánico.

Plutón no constituye, pues, ninguna anomalía. Forma parte de un vasto enjambre de cuerpos menores que giran alrededor del Sol a una distancia de cinco mil millones a ocho mil millones de kilómetros. Se supone que esta región externa esconde pistas muy valiosas sobre los orígenes del sistema solar. Por desgracia, la enorme distancia que nos separa limita la calidad de las observaciones realizadas desde la Tierra. La mejor imagen que tenemos del planeta la tomó el telescopio espacial *Hubble*; muestra sólo borrosas regiones de luz y oscuridad de su superficie. Y aunque las sondas espaciales *Pioneer, Voyager* y *Galileo* han proporcionado imágenes excelentes de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, con sus satélites, ninguna nave se ha aventurado todavía por el sistema Plutón-Caronte ni por el cinturón de Kuiper.

Fósiles espaciales

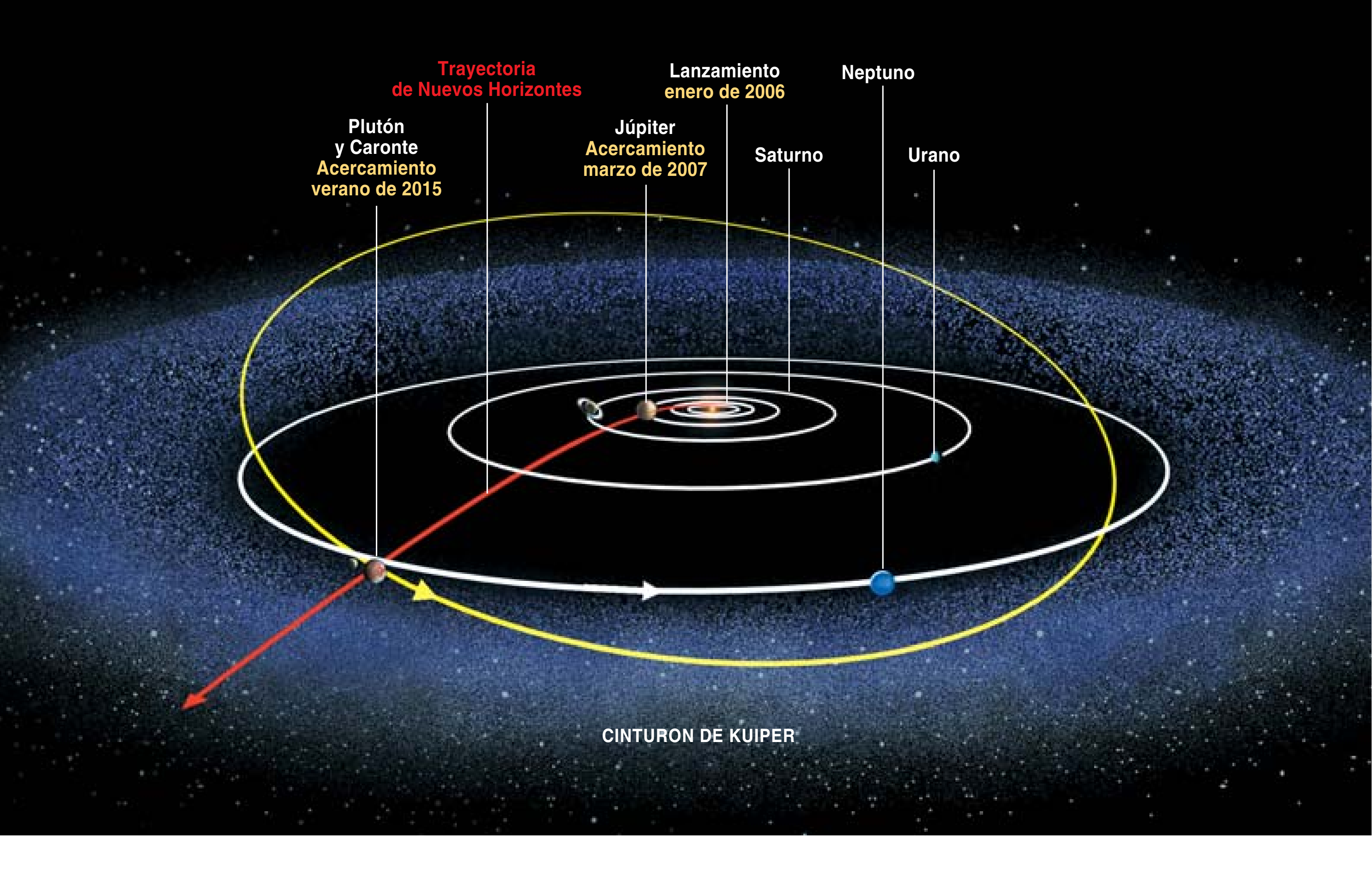
¿Por qué muestran tanto interés los astrónomos en el estudio de Plutón, Caronte y cuerpos parecidos? Por motivos múltiples, aunque aquí nos ceñiremos a una breve selección. De entrada, por su tamaño, forma y masa, el cinturón de Kuiper guarda un estrecho parecido con los anillos de escombros que se vienen observando desde hace 20 años alrededor de estrellas jóvenes, como Vega y Fomalhaut. Se les supone vestigios habituales de la formación de sistemas planetarios a partir de una nebulosa de gas y polvo en rotación en torno a una estrella. Hemos realizado simulaciones numéricas de los episodios que condujeron a la formación del cinturón de Kuiper, hace unos cinco mil millones de años, en la época en que el sistema solar emergía de su nebulosa primitiva. Llegamos a la conclusión siguiente: para que la aglomeración de granos de materia contenidos en el cinturón engendre cuerpos de la talla de Plutón, Caronte y otros transneptunianos, el cinturón de Kuiper primitivo hubo de alcanzar una masa unas cien veces superior a la ac-

Resumen/*Nuevos horizontes*

- Los astrónomos han comprendido, por fin, que Plutón no constituye ninguna anómala rareza; antes bien, se trata del más brillante de un vasto conjunto de objetos que giran alrededor del Sol en una remota región conocida por cinturón de Kuiper. Se supone que Plutón y los cuerpos del cinturón de Kuiper encierran claves únicas para entender la historia primigenia de los planetas.
- Plutón y su satélite, Caronte, merecen también atención especial por sí mismos. De un tamaño parecido ambos, puede el sistema considerarse un planeta doble. Además, la atmósfera de Plutón se está disipando con rapidez y sigue complejos patrones estacionales.
- La NASA ha elegido al equipo *Nuevos Horizontes* para que construya una nave espacial que estudiaría Plutón, Caronte y varios objetos del cinturón de Kuiper en una sucesión de aproximaciones. La sonda podría lanzarse en 2006 para llegar a Plutón en 2015.

RUMBO A LOS CONFINES

El viaje a Plutón duraría menos de diez años si la nave espacial *Nuevos Horizontes* se lanzara en 2006. Viajando a lo largo de la trayectoria prevista (*línea roja*), *Nuevos Horizontes* se acercaría inicialmente a Júpiter, cuya gravedad la proyectaría hacia Plutón (*órbita amarilla*). Tras investigar Júpiter en 2007 y el sistema Plutón-Caronte en 2015, reconocería a continuación varios de los helados cuerpos del cinturón de Kuiper.



DON DIXON

tual. Esa masa habría bastado para formar otro planeta del tamaño de Urano o Neptuno.

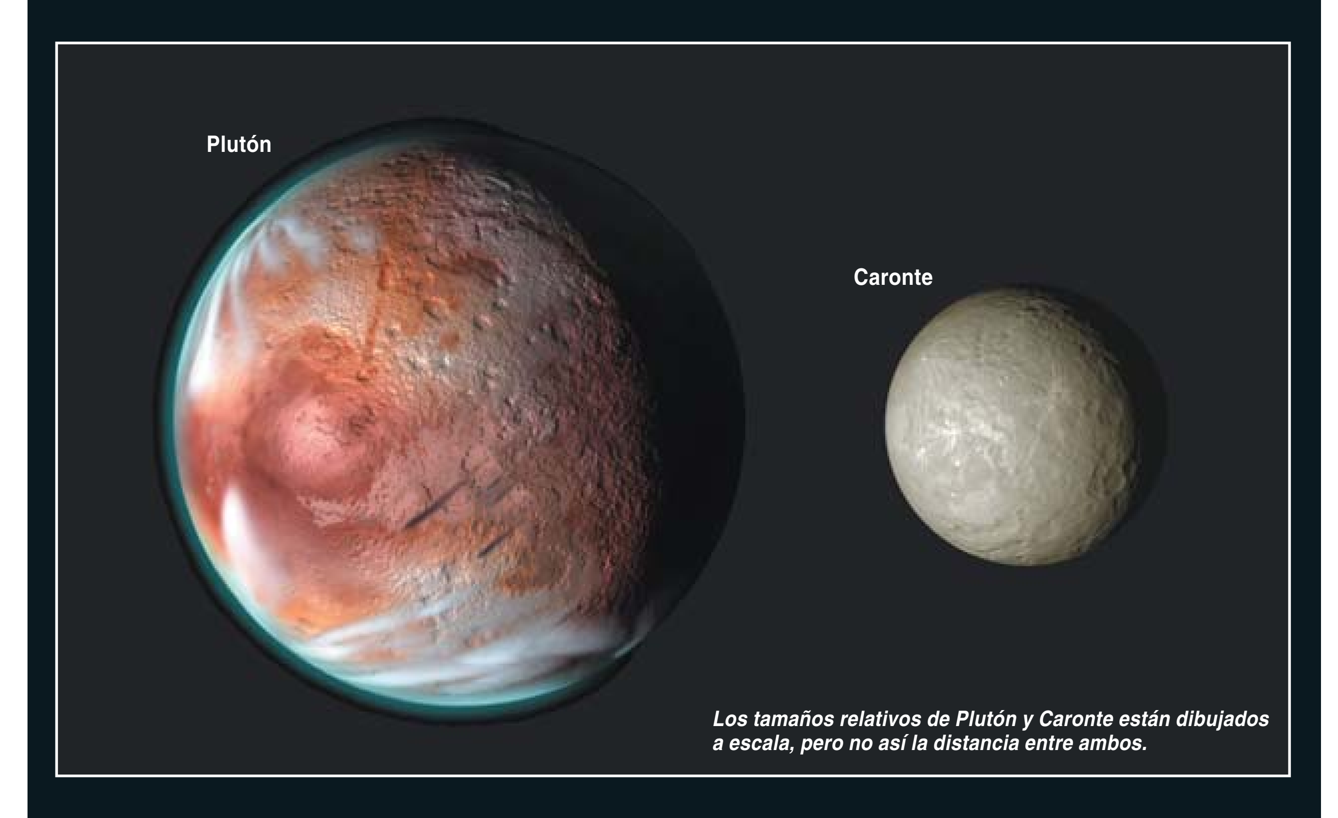
Revelaron nuestras simulaciones que en un tiempo muy breve se habrían formado tales planetas gigantes a partir de planetoides del cinturón de Kuiper. Puesto que no ha sido ése el caso, entendemos que hubo de producirse un episodio de perturbación del cinturón por la época en que apareció Plutón. Se trató quizá de la formación de Neptuno en la vecindad del borde interno del cinturón de Kuiper. La influencia gravitatoria del planeta habría interrumpido el proceso de constitución de otro gigante gaseoso más alejado del Sol. Pero de haber ocurrido eso deberíamos explicar por qué la formación de Urano no frustró la de Neptuno.

De acuerdo con otra hipótesis, bajo la influencia de Urano y Neptuno habríase expulsado hacia el exterior una población inmensa de embriones planetarios: cuerpos rocosos de miles de kilómetros de diámetro, formados en una zona más interna del sistema solar. Al atravesar el cinturón de Kuiper lo habrían desestabilizado, provocando, por ejemplo, la caída de un gran número de cuerpos transneptunianos hacia el interior del sistema solar. Por no hablar de otros mecanismos, asimismo posibles. Cualquiera que fuese la causa, el cinturón de Kuiper perdió la mayor parte de su masa, con la súbita interrupción consiguiente del crecimiento de los cuerpos de dicha región. Los OCK, o cuerpos transneptunianos, constituyen los vestigios de ese antiguo mecanismo de acreción en el curso del cual la aglomeración de granos de materia, de bloques de embriones planetarios luego, dio origen al sistema solar. Explorar Plutón y el cinturón de Kuiper presenta similitudes con una campaña arqueológica. Allí se encierran claves valiosas de la génesis del sistema solar exterior.

En cuanto a Plutón y Caronte, lo poco que de ellos conocemos nos permite asegurar que constituyen un paraíso para el planetólogo. Sor-

MUNDOS LEJANOS

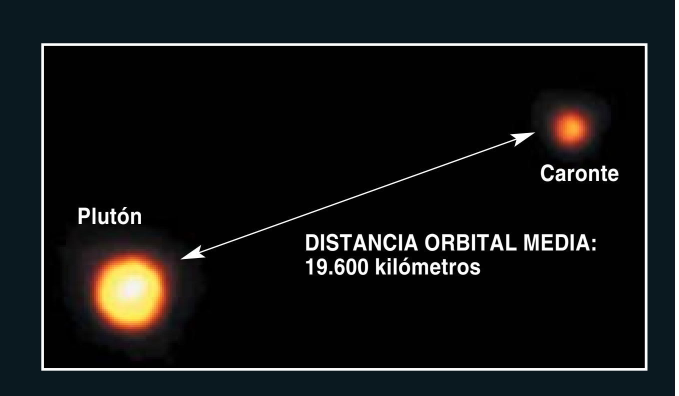
Los astrónomos están muy interesados en obtener vistas detalladas de Plutón y su satélite, Caronte; esta interpretación artística (*arriba*) se basa en los conocimientos actuales sobre ambos cuerpos. Al hallarse tan remoto de nosotros el sistema Plutón-Caronte, ni siquiera el telescopio espacial *Hubble* puede mostrarnos algo más que imágenes borrosas (*abajo*).



Los tamaños relativos de Plutón y Caronte están dibujados a escala, pero no así la distancia entre ambos.

INFORMACION GENERAL

Diámetro de Plutón: 2400 kilómetros
Diámetro de Caronte: 1200 kilómetros
Distancia media de Plutón-Caronte al Sol: 5900 millones de kilómetros
Período orbital alrededor del Sol: 248 años
Distancia media entre Plutón y Caronte: 19.600 kilómetros
Período orbital de Caronte alrededor de Plutón: 6,39 días
Períodos de rotación de Plutón y Caronte: 6,39 días
Composición superficial de Plutón: hielos de nitrógeno, monóxido de carbono, metano y agua
Composición superficial de Caronte: agua helada y posiblemente otros compuestos



DON DIXON *(representación artística)*; NASA/ESA/ESO *(Imagen del Hubble)*

prende, por ejemplo, el tamaño de Caronte: su diámetro, de unos 1200 kilómetros, mide la mitad del de Plutón; el propio sistema Plutón-Caronte puede considerarse un caso único de planeta doble. En el curso de los últimos años se han descubierto numerosos asteroides dobles y otros cuerpos del cinturón de Kuiper parecen entrar también en esa categoría. Christian Veillet acaba de establecer que el transneptuniano 1998W31 es un astro doble muy distinto del sistema Plutón-Caronte, cuyos dos componentes gravitan uno en torno al otro en 570 días sobre una órbita muy elíptica. Por lo demás, parece que los objetos binarios abundan no sólo en nuestro sistema solar, sino también en otros sistemas planetarios; representan el uno por ciento de los objetos descubiertos en el cinturón de Kuiper.

Importa desentrañar los mecanismos de formación de los mismos. De acuerdo con la teoría que goza de mayor aceptación, Plutón habría colisionado con otro cuerpo celeste en un pasado lejano; los escombros del impacto quedarían en órbita al-

El autor

S. ALAN STERN es astrónomo planetario e investigador principal de la misión Nuevos Horizontes de la NASA a Plutón y al cinturón de Kuiper. Ha participado y dirigido numerosos experimentos espaciales; vuela a bordo de F-18 y otros aviones de altas prestaciones de la NASA para realizar investigaciones astronómicas a gran altitud. Se doctoró en ciencia planetaria y astrofísica por la Universidad de Colorado en 1989. Es director del departamento de estudios espaciales del Instituto de Investigación del Sudoeste, en Boulder, Colorado.

rededor del planeta, donde terminaron por aglomerarse hasta engendrar a Caronte. Puesto que un choque similar condujo a la individualización de la Luna, se espera que el estudio de Plutón-Caronte arroje algo de luz sobre las condiciones iniciales del nacimiento de nuestro satélite.

¿Por qué el aspecto de Plutón difiere tanto del relieve de Caronte? Las observaciones realizadas desde la Tierra, sumadas a las imágenes tomadas por el telescopio espacial *Hubble*, muestran que Plutón tiene una superficie con una alta reflectividad y marcas nítidas que indican la presencia de enormes casquetes polares. Por el contrario, la superficie de Caronte es mucho menos reflectiva y sus marcas están menos pronunciadas. Goza Plutón de una atmósfera, no así Caronte, al parecer. Se ignora, además, si tales diferencias obedecen a una evolución divergente, consecuencia quizá de su tamaño y composición dispares, o si derivan de su modo de formación.

En 1989, cuando la sonda *Voyager 2* pasó cerca de Neptuno, los astrónomos se encontraron con que Tritón, su satélite más poderoso, desarrollaba una intensa actividad volcánica. Ahora bien, la densidad, el tamaño y la composición de la superficie de Plutón guardan un notabilísimo parecido con los de Tritón. ¿Podremos inferir que Plutón presenta también actividad volcánica? ¿Y los objetos del cinturón de Kuiper? De acuerdo con el estado actual de nuestro conocimiento, los cuerpos celestes pequeños se enfrían muy pronto y apenas retienen elementos radiactivos que les faculten para una actividad geológica perdurable. Por tanto, no deberíamos esperar vulcanismo; pero tampoco cabía prever la actividad de Tritón. Queda, pues, mucho por avanzar en la comprensión de esos mundos a escala reducida, conocimiento que habrá de venirnos de la exploración de Plutón y el cinturón de Kuiper.

La atmósfera de Plutón merece un apartado especial. Aunque 30.000 veces menos densa que la terrestre, revela enseñanzas únicas de la dinámica de las atmósferas planetarias. En la Tierra sólo el agua experimenta transiciones de fase repetidas que la obligan a pasar por sus tres estados, sólido, líquido y gaseoso. En la atmósfera de Plutón hay tres sustancias que acometen dicho ciclo: nitrógeno, monóxido de carbono y metano. La temperatura varía en Plutón alrededor de un cincuenta por ciento a lo largo de su superficie: desde unos 40 kelvin hasta unos 60. El planeta alcanzó su máxima aproximación al Sol en 1989. Conforme se va alejando, decrece su temperatura media, se condensarán los componentes de su atmósfera y, por último, precipitarán en forma de nieve. Por ello, parece plausible que nos hallemos ante el planeta del sistema solar que presenta la mecánica de las estaciones más compleja.

Además de tales cuestiones físicoquímicas, vale la pena resaltar que la atmósfera de Plutón se disipa en el espacio a una velocidad próxima a la de las atmósferas cometarias. La mayoría de las moléculas de la atmósfera superior tienen suficiente energía térmica para librarse de la gravedad del planeta, en virtud de un mecanismo de evaporación hidrodinámica. Aunque este fenómeno no se ve hoy en ningún otro planeta, quizá fuera la causa, en la Tierra, de la veloz desaparición de buena parte del hidrógeno de la atmósfera en el comienzo de su historia; puede que contribuyera así a que la Tierra resultase adecuada para la vida. Plutón es el único planeta del sistema solar donde se puede estudiar ahora el mecanismo de evaporación hidrodinámica.

Existe un lazo de notable interés entre Plutón y la aparición de la vida sobre la Tierra. Desde principios de los años ochenta se viene postulando que determinados objetos de tipo cometario, venidos quizá del cinturón de Kuiper, habrían aportado a la Tierra los compuestos orgánicos de los que carecía en sus inicios. Sabemos ahora que Plutón aloja metano congelado en su superficie y agua helada en su interior. De acuerdo con observaciones recientes de otros cuerpos del cinturón de Kuiper, abrigarían, éstos también, grandes cantidades de hielo y compuestos orgánicos. Se cree que hace miles de millones de años era corriente que esos objetos se adentrasen en la parte interior del sistema solar; debieron de sembrar entonces la Tierra con las materias primas de la vida.

Todo un periplo

En noviembre del año 2001, la NASA escogió el proyecto *Nuevos Horizontes* para llevar a cabo la misión Plutón-cinturón de Kuiper. Lo propusieron nuestro equipo del Instituto de Investigaciones del Sudoeste, con sede en San Antonio, Texas, y el Laboratorio de Física Aplicada (APL) de la Universidad Johns Hopkins. Astrónomos de una docena de universidades preparan las observaciones científicas. Del seguimiento y guía de la sonda se encargará el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL). El coste total de la misión se cifra en 500 millones de euros (90 de ellos en reserva presupuestaria). La nave podría acercarse a Plutón en el verano del año 2015.

El pliego de condiciones de la NASA para las misiones a Plutón y el cinturón de Kuiper fijaba tres prioridades científicas. La nave debe, primero, levantar planos de las superficies de Plutón y Caronte con una resolución media de un kilómetro (el telescopio espacial *Hubble* sólo llega a una resolución de alrededor de 500 kilómetros cuando apunta a Plutón y Caronte). En segundo lugar, la sonda debe analizar la composición de la superficie en diferentes regiones de ambos cuerpos celestes; por último, ha de determinar la composición y la estructura de la atmósfera de Plutón, así como la velocidad de evapora-

ción. A esos tres principales, la agencia sumó otros objetivos menores que debíamos cumplir: entre ellos la medida de las temperaturas de la superficie y la búsqueda de otros satélites o anillos alrededor de Plutón. Exigía además que la nave abordase las mismas tareas para al menos un objeto del cinturón de Kuiper situado más allá de Plutón.

Nuestra nave *Nuevos Horizontes* pesará sólo 416 kilogramos; es decir, más que las primeras sondas *Pioneer* y menos que los *Voyager*. Se incluye ahí el combustible de hidracina, que se usará para ajustar la trayectoria de la nave en vuelo. La mayoría de los subsistemas —los ordenadores, el sistema de control de la propulsión— se basan en diseños ya aplicados a la sonda CONTOUR (anagrama de "Viaje por los Núcleos Cometarios"), que se acercará a varios cometas. Casi todos los subsistemas de la nave llevan un equipo de repuesto que aumenta la fiabilidad en el largo vuelo hasta Plutón y el cinturón de Kuiper.

La nave transportará cuatro conjuntos de instrumentos. Un equipo de cartografía y espectrometría, PERSI, realizará observaciones en las partes visible, ultravioleta e infrarrojo del espectro. El espectrómetro de formación de imágenes por infrarrojo del PERSI permitirá abordar la composición química, el estado físico y la temperatura de los hielos presentes en la superficie de Plutón y Caronte. Con el REX, un instrumento de radioastronomía, se sondeará la estructura atmosférica de Plutón y medirán las temperaturas medias superficiales de Plutón y Caronte (en los lados diurnos y nocturnos de ambos cuerpos) a partir de la intensidad de la radiación de microondas que incidirá sobre la antena parabólica de 2,5 metros de anchura de la nave espacial. Un tercer conjunto de instrumentos, PAM, consta de diversos detectores de partículas cargadas, concebidos para recoger material que escape de la atmósfera de Plutón y determinar su tasa de evaporación. El cuarto instrumento es LORRI, una cámara para la toma de imágenes de alta resolución que superará las ya formidables facultades cartográficas de PERSI. En el momento en que más cerca del sistema de Plutón-Caronte se halle la sonda, los mapas globales de esos objetos confeccionados por PERSI tendrán una resolución media de un kilómetro. Pero LORRI, que tomará imágenes de regiones seleccionadas, podrá detectar accidentes veinte veces más pequeños.

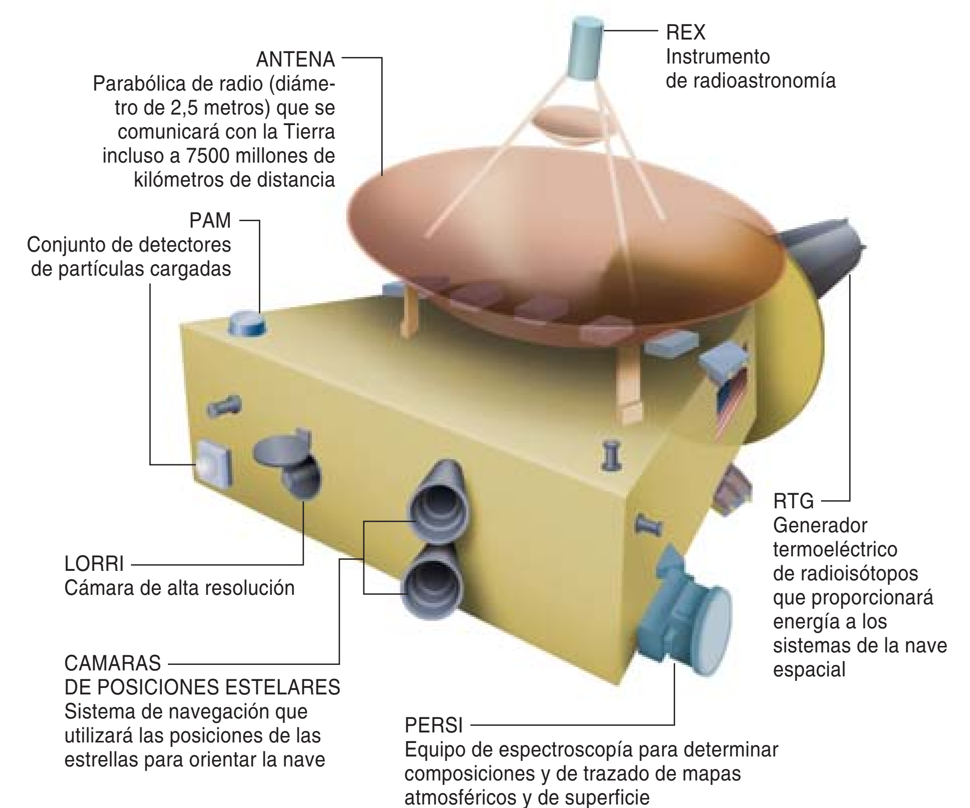
Si todo se desarrolla de acuerdo con lo proyectado, la nave se lanzará en enero de 2006. Se aproximará primero a Júpiter, cuyo campo de gravedad la catapultará hacia Plutón. En su acercamiento a Júpiter, *Nuevos Horizontes* estudiará a fondo durante cuatro meses el sistema del planeta, con más de veinte satélites, así como sus auroras, atmósfera y magnetosfera. Gracias al impulso gravitatorio de Júpiter, alcanzará el sistema Plutón-Caronte pronto, en 2015. (La fecha exacta de llegada dependerá del vehículo de lanzamiento que seleccione la NASA y del día de enero de 2006 en que se emprenda vuelo.)

Durante gran parte del largo viaje de Júpiter a Plutón, *Nuevos Horizontes* permanecerá inactiva, en hibernación electrónica. Al desconectar los sistemas innecesarios y reducir los contactos con la nave, se limitarán los riesgos de averías y se ahorrará en costes operativos de la misión. Durante ese período de hibernación, la nave transmitirá de modo permanente una simple señal de estado a la Tierra; si se presenta un problema inesperado, nuestro equipo de control en tierra intervendrá. Una vez al año se la despertará durante unos cincuenta días para comprobar exhaustivamente los sistemas, corregir el curso y calibrar los instrumentos científicos.

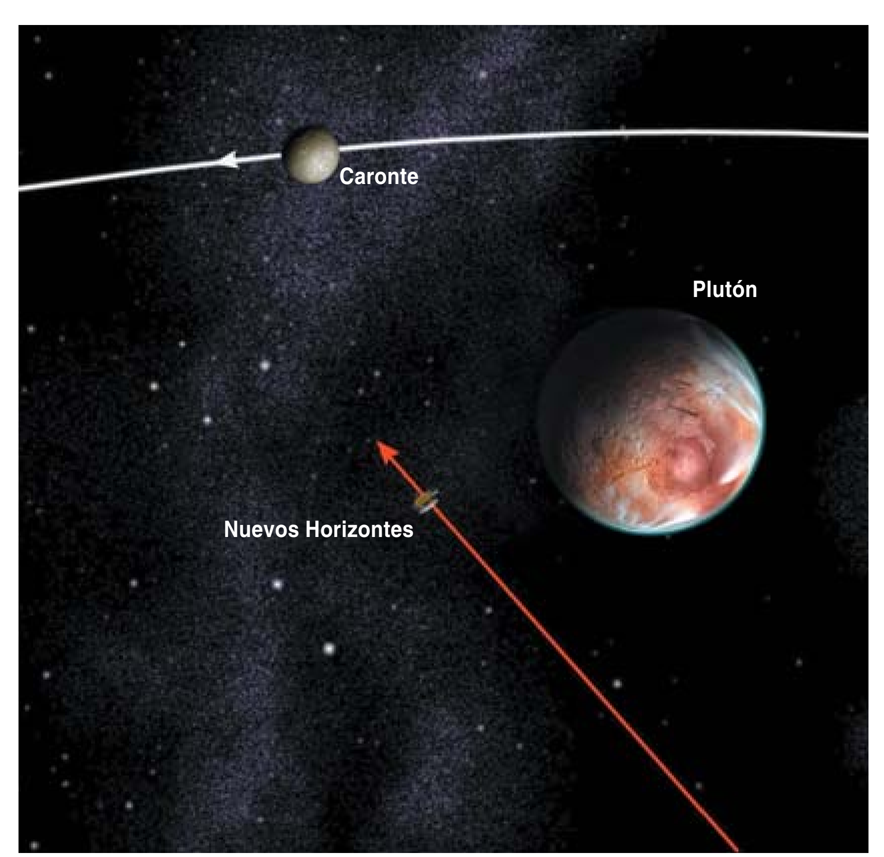
Nuevos Horizontes comenzará el estudio de este sistema seis meses antes de alcanzar su punto de apro-

NAVE ESPACIAL NUEVOS HORIZONTES

Para explorar Plutón, Caronte y los objetos del cinturón de Kuiper, la nave propuesta transportaría cuatro conjuntos de instrumentos: REX, PAM, PERSI y LORRI. La sonda pesará unos 416 kilogramos. En su velocidad de crucero, entre Júpiter y Plutón, alcanzará los 70.000 kilómetros por hora. Podrá almacenar hasta 48 gigaoctetos de datos.



JUAN VELASCO



DON DIXON

2. LA EXPLORACION DE PLUTON por la nave espacial *Nuevos Horizontes* alcanzará su culminación en el momento en que más cerca esté del planeta, sólo a unos pocos miles de kilómetros de la superficie. Se muestra aquí la trayectoria de aproximación vista desde un punto interior de la órbita de Caronte en torno a Plutón, un poco por encima del plano orbital.

ximación al planeta. En cuanto la sonda se halle a unos cien millones de kilómetros de Plutón —alrededor de 75 días antes de la máxima cercanía—, transmitirá mejores imágenes de éste que el telescopio espacial *Hubble*. Los resultados irán depurándose en los días subsiguientes. En las semanas anteriores a la máxima cercanía, el equipo de la misión podrá trazar mapas de Plutón-Caronte cada vez más detallados y observar el clima de Plutón, comparando las imágenes del planeta en función del tiempo. Además, gracias a las prestaciones de toma de imágenes de alta resolución de LORRI, obtendremos vistas ampliadas de partes de Plutón y Caronte que valdrán para decidir qué zonas merecen un examen más minucioso. En el día de la máxima aproximación, cuando *Nuevos Horizontes* esté tan sólo a unos pocos miles de kilómetros de Plutón, PERSI obtendrá sus mejores mapas de conjunto de las caras iluminadas de Plutón y Caronte. Mientras tanto, LORRI levantará mapas de mayor resolución de docenas de zonas menores.

Ahora o nunca

Una vez haya superado Plutón, la nave lo rodeará y trazará mapas de su lado nocturno, suavemente iluminado por la luz refleja de Caronte. Cinco horas y media antes, habremos lanzado desde la Tierra, un poderoso haz de radio que atravesará la atmósfera de Plutón hasta alcanzar la antena de la sonda. Midiendo la refracción del haz, la sonda establecerá la temperatura y el perfil de densidad de la temperatura de Plutón, desde elevadas altitudes hasta la superficie. Después del encuentro con Plutón-Caronte, *Nuevos Horizontes* maniobrará para consagrar los cinco años siguientes a sobrevolar en torno a tres cuerpos, por lo menos, del cinturón de Kuiper (el número exacto de encuentros dependerá de la cantidad de combustible que quede en la nave espacial después de explorar Plutón).

La misión *Nuevos Horizontes* promete revolucionar nuestro conocimiento tanto del sistema Plutón-Caronte como del cinturón de Kuiper. No obstante, la posibilidad de realizar descubrimientos se perderá si no emprende viaje en 2006. Debido al alineamiento variable de los planetas, pasado ese año la nave ya no podría acelerarse hacia Plutón mediante un impulso gravitatorio de Júpiter. Si se perdiese esta oportunidad, la NASA tendría que esperar hasta 2018 a que Júpiter estuviera otra vez en el lugar exacto; cualquier encuentro se retrasaría hasta mediados de la década de 2020. En esa época Plutón se hallará millones de kilómetros más alejado del Sol y bastante más frío que ahora. La combinación de la extrema inclinación polar de Plutón y de su peculiar trayectoria alrededor del Sol hará que más de cuatro millones de kilómetros de terreno —la mayor parte del hemisferio sur— se encuentren sumidos en una oscura noche polar; no podría observarse esa parte del planeta. También es probable que para entonces se haya condensado casi toda la atmósfera, cerrando cualquier oportunidad de estudiarla hasta el siglo XXIII, cuando el planeta vuelva a estar cerca del Sol.

Bibliografía complementaria

PLUTÓN. Richard P. Binzel en *Investigación y Ciencia*, número 167, páginas 20-28, agosto 1990.

PLUTO AND CHARON: ICE WORLDS ON THE RAGGED EDGE OF THE SOLAR SYSTEM. S. Alan Stern y Jacqueline Mitton. John Wiley & Sons, 1999.

BEYOND PLUTO: EXPLORING THE OUTER LIMITS OF THE SOLAR SYSTEM. John Davies. Cambridge University Press, 2001.

La recombinación homóloga del ADN

Utilizada en la elaboración de mapas genéticos y en bioingeniería, la recombinación homóloga del ADN constituye la base de múltiples procesos celulares

Andrés Aguilera

El genoma de los organismos no es un elemento fijo e invariable, sino que combina la estabilidad requerida para la herencia con la flexibilidad necesaria para el cambio. Dicha flexibilidad es posible gracias a la recombinación genética, pilar básico, junto con la mutación, de la variación natural y la evolución.

Del fenómeno de la recombinación se ocupó, a principios del siglo pasado, Thomas H. Morgan, quien demostró con la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster* que los genes próximos de un mismo cromosoma mostraban ligamiento, es decir, que se transmitían juntos, si no mediaba un intercambio físico o entrecruzamiento de segmentos cromosómicos.

La recombinación constituye el proceso biológico en cuya virtud dos segmentos de ácidos nucleicos interaccionan físicamente entre sí y dan lugar a un cambio en el ligamiento o en la información de al menos uno de ellos.

Descubierta inicialmente como fenómeno de la meiosis, o sucesión de dos divisiones celulares con una sola reproducción cromatídica, que permitió definir la posición de los genes en los cromosomas, la recombinación del ADN interviene en la integración del genoma de los virus en los cromosomas de las células, en la replicación de algunos bacteriófagos, en la diversidad de la respuesta inmunitaria de los vertebrados y en el cambio de sexo en levaduras. La encontramos también en el origen de la variación antigénica de patógenos unicelulares, como la bacteria *Neisseria gonorrhoeae* —causante de la gonorrea— o en el eucariota *Trypanosoma brucei* —causante de la enfermedad del sueño—, que escapan así al sistema inmunitario humano.

Esencial en ingeniería genética para la manipulación de los genomas *in vivo* y la construcción de organismos transgénicos, la recombinación puede hallarse detrás de algunos fenómenos de inestabilidad genética asociados a tumores.

En función de su mecanismo molecular, existen varios tipos de recombinación, siendo el más importante el de la recombinación homóloga. Esta sólo ocurre entre secuencias idénticas o casi idénticas de ADN. Desempeña un





1. LA RECOMBINACION es un proceso presente en todos los seres vivos, unicelulares o multicelulares. Si las colonias que forman la levadura *Saccharomyces cerevisiae* (*a*), normalmente de color blanco, son heterocigóticas para un marcador de color como *ADE2*, se pueden observar sectores rojos homocigóticos mutantes que surgen por recombinación mitótica. En humanos, un individuo heterocigótico portador de dos alelos mutantes del gen *COL17A1*, que provoca la enfermedad de la piel llamada genodermatosis, presenta parches de piel normal producidos por recombinación somática (*b*).

2. DURANTE LA MITOSIS las cromátidas permanecen unidas por los centrómeros hasta que se segregan en las células hijas, pudiéndose observar la recombinación entre cromátidas hermanas, como en las células de cebolla (*Allium cepa)* tratadas con mitomicina C.



GENTILEZA DE FELIPE CORTES (UNIVERSIDAD DE SEVILLA)

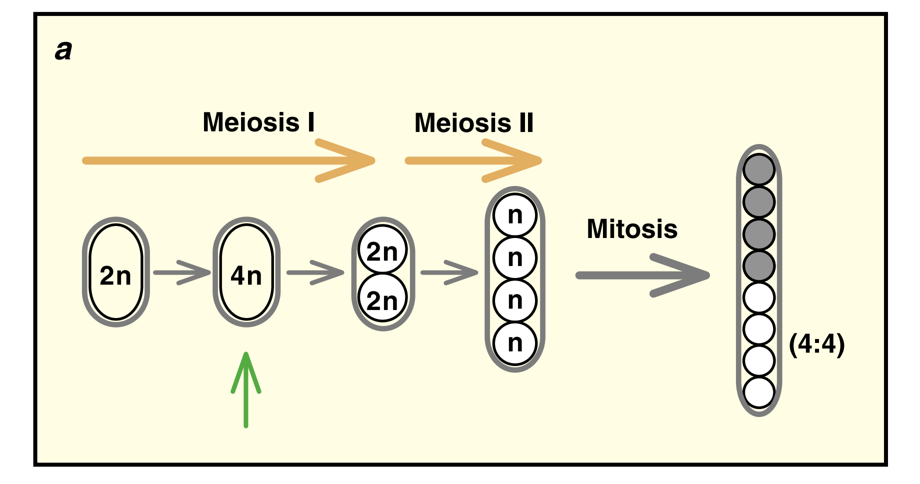
papel esencial en la meiosis y en la reparación del ADN de células somáticas.

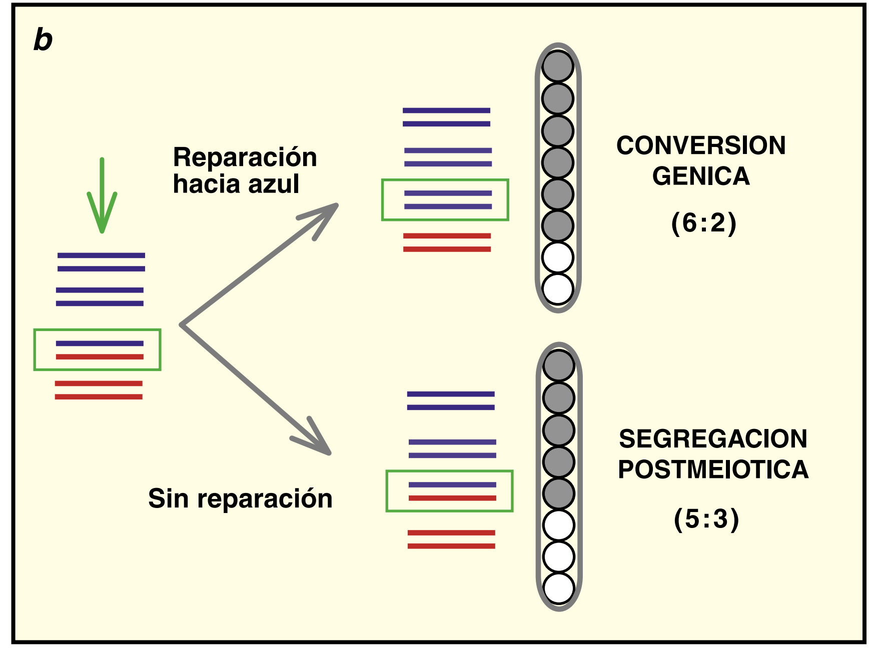
La función meiótica

El interés de la recombinación homóloga en la meiosis trasciende el intercambio genético. En la mitosis, las dos cromátidas, o filamentos, resultantes de la replicación de un cromosoma se mantienen unidas por el centrómero. Así persisten hasta el momento de su distribución a las células hijas.

Durante la división I de la meiosis, en la que se reduce el número de cromosomas a la mitad, los dos cromosomas homólogos ya replicados (es decir, con dos cromátidas cada uno) permanecen unidos por quiasmas, unas estructuras vestigios de la recombinación o entrecruzamiento. La recombinación aparece, pues, íntimamente ligada al proceso de emparejamiento de cromosomas homólogos en la meiosis.

La primera manifestación citológica del emparejamiento se observa en el complejo sinaptonémico (SC), una estructura proteica que se ensambla entre cada par de cromosomas homólogos durante la profase meiótica. Esa presumible asociación íntima entre SC y recombinación se ratifica en los machos de *Drosophila*, que no forman quiasmas ni ensamblan SC, en los mutantes de *Drosophila* y de la levadura *Saccharomyces* defectuosos a la vez en SC y en



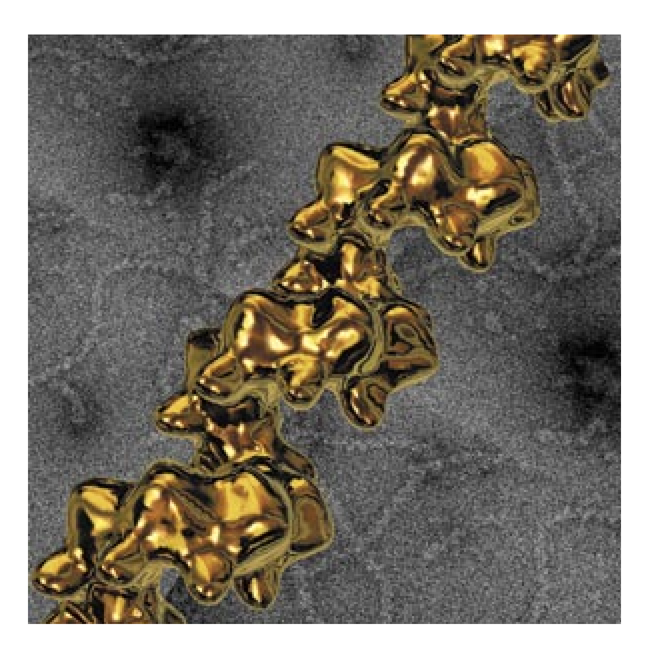


ANDRES AGUILERA

3. LA MEIOSIS DE *NEUROSPORA* es ideal para el estudio de la recombinación meiótica (*a*). Tras las dos divisiones de la meiosis del hongo ocurre una división mitótica adicional que produce ocho esporas haploides dentro del asca, que por restricción de espacio se disponen de forma ordenada según se van dividiendo. Por tanto, cada espora contiene una cadena de ADN de las ocho que la célula diploide original poseía tras la replicación premeiótica en el estado 4n (*flecha verde*). A partir de un heterocigoto para un marcador de color se obtienen ascas con la mitad de las esporas de un color (*gris*) y la otra mitad del otro (*blanco*) observándose la esperada segregación mendeliana 4:4. Sin embargo, en algunos casos se obtienen segregaciones no mendelianas (*b*) como 6:2 y 5:3. Ambos tipos de segregaciones tienen sentido si durante la fase 4n, tras la replicación (*flecha verde*), se forma un heterodúplice o híbrido de dos cadenas de ADN (*azul y roja*), cada una proveniente de una cromátida homóloga. Dependiendo de que se corrija o no dicho heterodúplice, intermediario de la recombinación, se puede obtener la conversión génica o la segregación postmeiótica.

recombinación, así como en los saltamontes, cuyos quiasmas se ubican en aquellas regiones donde se ensambla el complejo sinaptonémico.

Podemos afirmar que la recombinación homóloga ha adquirido un papel fundamental en la meiosis, en la segregación y división correcta de los cromosomas a la mitad. Así, en *Saccharomyces* y *Drosophila* los mutantes afectados en recombinación también lo están en segregación. Por otro lado, en los pares cromosómicos XY humanos, cuya interacción posible se circunscribe a las regiones de homología (las regiones seudoautosómicas), la recombinación entre éstas ocurre con una frecuencia excepcionalmente alta. De ese modo, se compensa la falta de quiasmas en el resto del cromosoma y se asegura al menos un quiasma por par XY que garantice su correcta segregación.



4. RecA SE UNE A ADN formando filamentos nucleoproteicos RecA-ADN tal y como se observan al microscopio electrónico (*fondo gris*). En estos filamentos RecA crea una estructura helicoidal (*en dorado*) que consta de 6 monómeros de RecA por vuelta. El ADN se dispondría por el eje central de dicha hélice.

GENTILEZA DE EDWARD H. EGELMAN (UNIVERSIDAD DE VIRGINIA, EE.UU.)

No faltan, empero, los ejemplos de disyunción correcta de cromosomas en ausencia de quiasmas. Se da en los machos de *Drosophila* o en las hembras del gusano de seda *Bombyx*. Se supone que la naturaleza ha desarrollado mecanismos alternativos de segregación distributiva imprescindibles para cromosomas u organismos sin recombinación meiótica. Así lo parece indicar el fenotipo de los mutantes *nod* de *Drosophila*, que presentan defectos de segregación en los cromosomas carentes de quiasmas sin afectar a los que sí los forman.

Intermediarios moleculares

Pese a los esfuerzos empeñados estamos lejos de conocer las bases moleculares de la recombinación homóloga. M. Meselson y J. Weigle demostraron, en 1961, que la recombinación homóloga no era un proceso meramente replicativo, en el que el producto recombinante se forma por el salto de la polimerasa de ADN desde un cromosoma hacia otro durante la replicación. Antes bien, exige rotura y unión de las dos moléculas que participan en la reacción. La recombinación provoca la reordenación de dos moléculas prácticamente idénticas, lo que dificulta la identificación del producto en una reacción *in vitro*. Pero éste puede inferirse a partir de un cruce genético, lo que ha permitido elaborar modelos moleculares que han contribuido a descifrar la bioquímica del proceso.

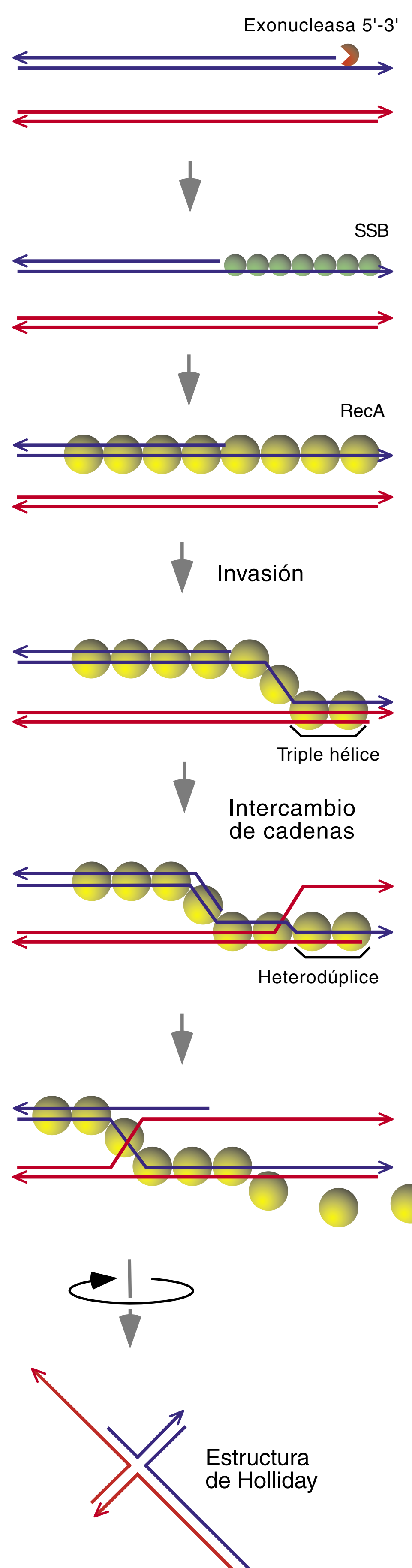
Los primeros modelos de recombinación se basaron en el análisis genético de la meiosis en la levadura *Saccharomyces* y en los hongos *Ascobolus*, *Neurospora* o *Sordaria*. R. Holliday propuso, en 1964, que la recombinación era un proceso de rotura y unión del ADN, en el que se producían dos intermediarios moleculares nuevos. El primero es el heterodúplice, un segmento de ADN de dos cadenas, procedente de una molécula distinta cada una; el heterodúplice se crea cuando una cadena de ADN de una cromátida invade a la cromátida del cromosoma homólogo. Si el heterodúplice abarca una región donde las moléculas recombinantes difieren, aunque sea en un solo par de bases, se daría un emparejamiento erróneo, susceptible de reparación. Si ésta ocurre en la dirección de la cadena invasora, se perdería la información de la cadena invadida, originando una conversión génica.

El segundo intermediario que predecía el modelo es la estructura de Holliday. Con forma de cruz (X), la estructura en cuestión resulta del cruce de las dos cadenas de ADN que se intercambian durante el proceso de invasión. La estructura cruciforme mantiene unidos a los dos cromosomas que participan en la recombinación, por lo que debe deshacerse para que se vuelvan a separar los cromosomas. Sólo uno de los dos sentidos posibles de la resolución generaría un intercambio recíproco o entrecruzamiento. La realidad de la estructura de Holliday fue confirmada en el microscopio electrónico por H. Potter y D. Dressler en 1977.

A partir de los dos intermediarios mencionados (heterodúplice y estructura de Holliday), podemos predecir la existencia de dos nuevas funciones celulares. La primera es una actividad de invasión e intercambio de cadenas, capaz de emparejar, mediante puentes de hidrógeno, dos cadenas complementarias de ADN provenientes de moléculas distintas. La segunda es la actividad resolvasa, encargada de deshacer las estructuras de Holliday.

La iniciación

El modelo original de Holliday y las variantes posteriores, en particular la propuesta por M. Meselson y C. Radding en 1975, sugerían que la recombinación se iniciaba por el corte de una sola cadena de ADN. Hoy se admite que una reacción de recombinación comienza con un corte en las dos cadenas de una molécula de ADN. El modelo de reparación por recombinación de roturas de doble cadena lo esbozaron en 1983 J.



5. LA INVASION E INTERCAMBIO DE CADENAS es una reacción catalizada por la proteína RecA en bacterias, o su homóloga Rad51p en eucariotas, a partir de una cadena sencilla de ADN. Una exonucleasa (*esfera roja*) degrada un extremo. A la cadena sencilla así formada se une la proteína SSB (RPA en eucariotas) (*esferas verdes*) y después RecA (Rad51p en eucariotas) (*esferas amarillas*). Durante el proceso de invasión se cree que primero se forma una región transitoria de triple hélice antes de que se produzca el intercambio de cadenas y se origine el heterodúplice y una estructura de Holliday estable. Aunque RecA cataliza la invasión de una cadena de ADN por el extremo hidroxilo (*punta de la flecha*), este hecho no se ha demostrado aún para Rad51p.

ANDRES AGUILERA

Szostak, T. Orr-Weaver, R. Rothstein y F. Stahl.

De la existencia de iniciadores de la recombinación comenzó a sospecharse en 1960, a raíz de los datos recabados en el hongo *Ascobolus*, que mostraban que, en meiosis, la conversión génica estaba polarizada; es decir, ocurría dentro de un *locus* de acuerdo con un gradiente de frecuencias minuente. Las secuencias iniciadoras de la recombinación debían ubicarse en la zona de alta frecuencia de conversión. En la región del gen *ARG4* de *Saccharomyces cerevisiae*, donde previamente se había inferido la existencia de un iniciador, los grupos de J. Szostak y N. Kleckner detectaron la acumulación de cortes de doble cadena, al principio de la profase meiótica, cortes que desaparecían antes de que acabara la misma. Tras el corte se generaba una cadena sencilla.

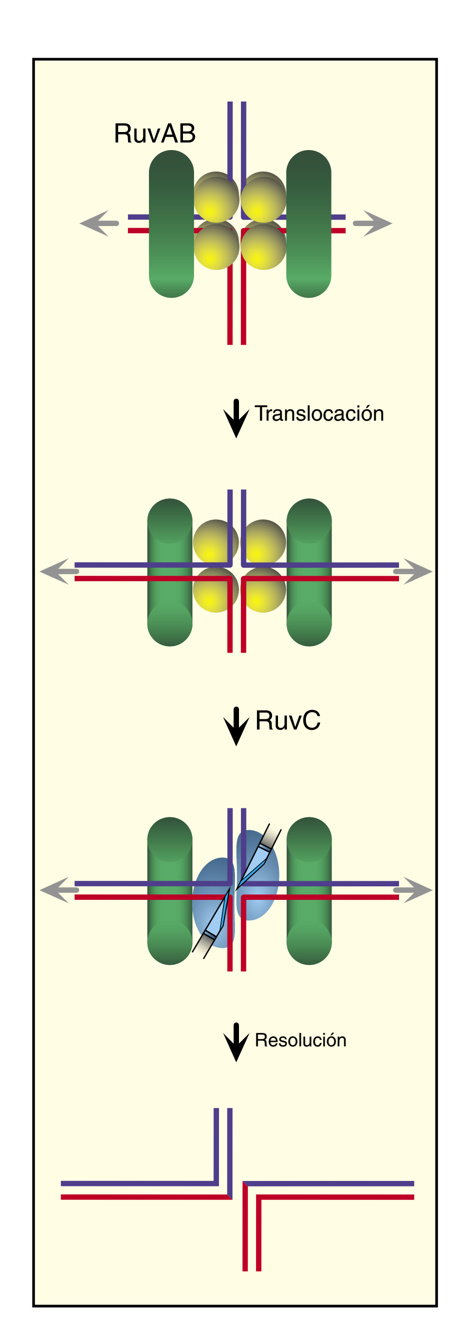
Los cientos de lugares cromosómicos donde se acumulan cortes de doble cadena en la meiosis de levaduras se encuentran en las regiones promotoras de la expresión de los genes. Tales regiones adoptan conformaciones que facilitan el acceso de las proteínas reguladoras de la expresión génica, así como de la proteína iniciadora de la recombinación. En *Saccharomyces*, ésta es con toda probabilidad Spo11p, un pariente lejano de las topoisomerasas, enzimas que regulan la topología del ADN mediante cortes en el ADN. Existen homólogos estructurales y funcionales en el gusano *Caenorhabditis*, en la mosca *Drosophila* y en ratones, por lo que cabe esperar también un homólogo humano de Spo11p. Tras el corte producido por Spo11p, la nucleasa Mre11p, conservada desde levaduras a mamíferos, es seguramente la encargada de generar la cadena sencilla necesaria para el siguiente paso de la reacción, el intercambio de cadenas.

La proteína iniciadora de la recombinación durante la conjugación bacteriana es la nucleasa RecBCD, que no se encuentra en eucariotas. Los genes *recB* y *recC*, junto con el gen *recD,* de la enterobacteria *E. coli,* determinan polipéptidos de 134, 129 y 67 kilodalton, respectivamente. Tales polipéptidos constituyen la proteína heterotrimérica RecBCD, cuya actividad depende de *Chi*, una secuencia de ocho pares de bases (GCTGGTGG) presente en el cromosoma bacteriano cada 20-40 kilobases aproximadamente. F. Stahl demostró, mediados los setenta, que la recombinación empezaba en las secuencias *Chi*.

El trímero RecBCD accede al ADN a través de un extremo libre de doble cadena. Avanza abriendo la doble hélice mediante una potente actividad helicasa. Durante ese proceso enzimático va degradando el ADN hasta que llega a la secuencia *Chi*. El grupo de S. Kowalczykowski ha observado, *in vitro*, que al llegar a *Chi*, el tripolipéptido sufre un cambio conformacional que puede conllevar la pérdida del monómero RecD. Como consecuencia, los dos polipéptidos restantes terminan por generar una cadena sencilla de ADN sobre la que puede actuar la proteína RecA para catalizar el intercambio de cadenas.

Invasión e intercambio de cadenas

En 1965 A. J. Clark y A. D. Margulies aislaron un mutante deficiente en recombinación, el mutante *recA*⁻ de *E. coli*, mutante



6. LA PROTEINA RuvA (*en amarillo*) es un tetrámero que se une a la estructura de Holliday, haciendo que ésta adopte una forma simétrica y plana. La proteína RuvB (*en verde*) es una helicasa hexamérica en forma de anillo por cuyo centro pasa la doble hélice. La translocasa RuvAB consta de dos tetrámeros de RuvA unidos a la estructura de Holliday, uno por cada lado de la misma, y dos anillos de RuvB. Actúa como una bomba translocadora por la que dos homodúplices entrantes se convierten en heterodúplices al salir por los anillos de RuvB (*a partir del segundo panel sólo se presenta una sección transversal de la estructura para su mejor visualización*). RuvC (*en azul*) actúa como un dímero con cuatro surcos internos sobre los que se dispone la estructura de Holliday, a la que corta y religa. Durante la resolución, un tetrámero de RuvA es substituido por un dímero de RuvC constituyéndose el resolvasoma RuvABC. De esta forma, a un lado de la estructura de Holliday se dispondría un tetrámero de RuvA (que no se ve en la figura por corresponder al plano anterior de la sección transversal presentada) y al otro un dímero de RuvC (presente en el plano posterior), todo ello flanqueado por los anillos de RuvB.

ANDRES AGUILERA

que llevó a la identificación de la proteína central de toda reacción de recombinación, la que cataliza la invasión e intercambio de cadenas.

Compete a RecA, una proteína de 38 kilodalton, la búsqueda de homología entre dos secuencias de ADN, así como el intercambio de cadenas. Hay entre 1000 y 10.000 monómeros de la proteína por célula. En condiciones fisiológicas de ATP y Mg^{++}, RecA se une al ADN construyendo filamentos multiméricos helicoidales. Aunque la formación del filamento nucleoproteico no requiere energía, no implica consumo de ATP, cada monómero de RecA presente en un nucleofilamento está unido a una molécula de ATP. La anchura del filamento de la proteína, unos 100 angstrom, quintuplica el diámetro de la doble hélice de ADN. Cada monómero de RecA se une a tres nucleótidos de ADN. Una vuelta de hélice del filamento mide 95 angstrom y usa 6 monómeros de RecA, por lo que cubre 18 pares de bases. Si consideramos que la separación de las bases de la forma B, la usual de doble hélice de J. Watson y F. Crick, es de 3,4 angstrom y una vuelta completa tiene 10 pares de bases, el ADN se estirará dentro del filamento 1,5 veces respecto a la forma B. Ese estiramiento de la doble hélice, cercano al máximo posible (1,7 veces), facilita el emparejamiento entre dos moléculas.

En una reacción de emparejamiento e intercambio de cadenas *in vitro*, la proteína RecA forma primero el nucleofilamento con la cadena sencilla de ADN y se extiende hasta la región contigua de doble cadena. La proteína promueve así la búsqueda de una doble hélice homóloga mediante un extremo hidroxilo libre de la cadena sencilla y configura una estructura de tres cadenas de ADN. En esa estructura sólo cabe la interacción entre secuencias homólogas. A continuación, cataliza el emparejamiento de la cadena sencilla invasora con la complementaria de la doble hélice invadida, aparta la otra cadena y da origen a un heterodúplice. La reacción de emparejamiento exige que RecA presente dos sitios de unión al ADN. Con el primero se ancla en el fragmento de ADN de la cadena sencilla, alrededor del cual se hila el filamento; con el segundo, contacta con la cadena de la doble hélice invadida.

Para reforzar el rendimiento de la reacción catalizada por RecA entran en acción otros factores. De entre éstos, la proteína SSB se une a cadenas sencillas antes que lo haga RecA, para impedir la aparición de estructuras secundarias. Otros factores, las proteínas RecF, RecO y RecR, operan como un solo complejo proteico; le facilitan a RecA su tarea de desplazar a SSB del ADN de cadena sencilla.

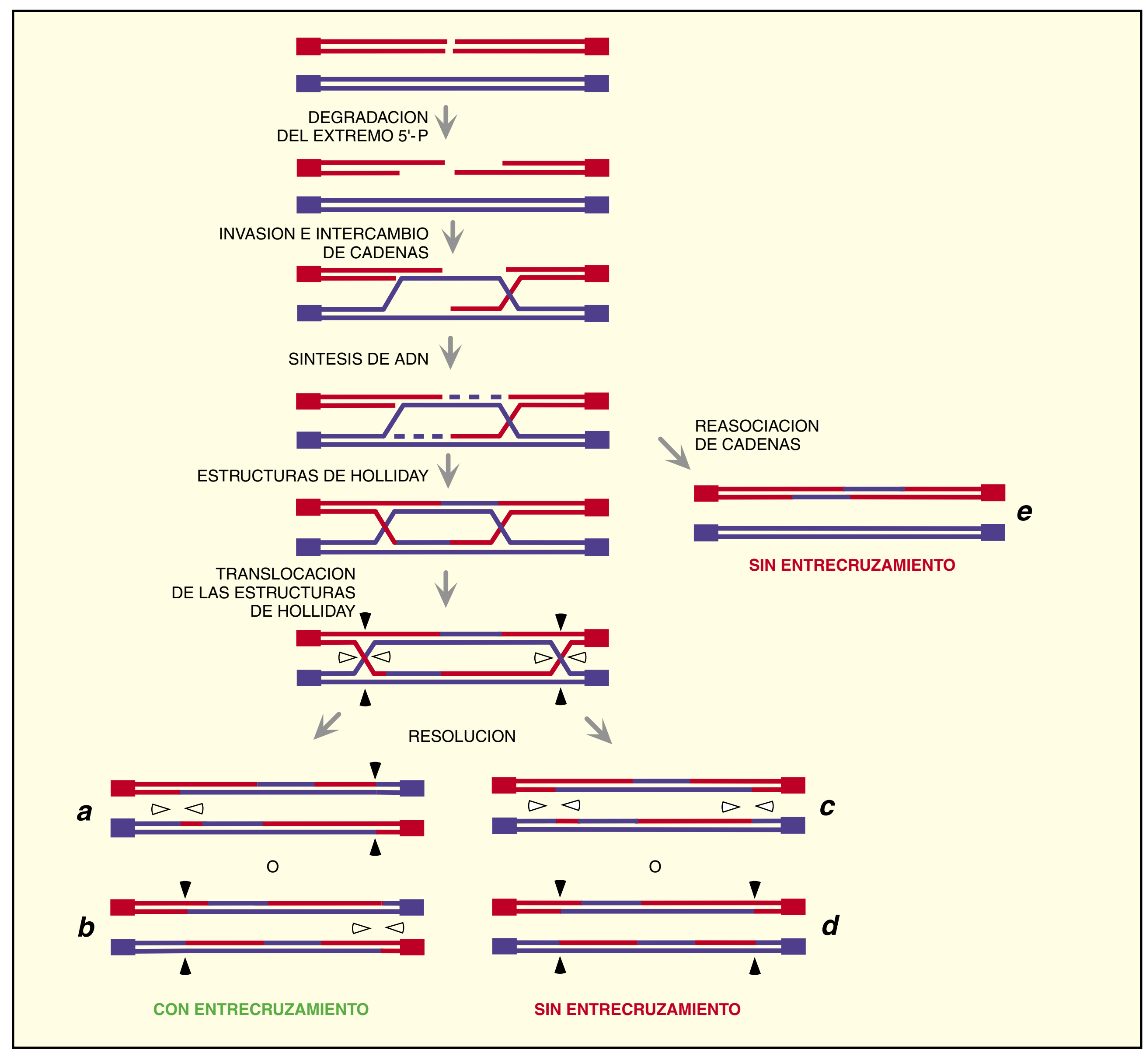
Al ser RecA la proteína responsable del paso central de la reacción de recombinación en *E. coli*, es de esperar la presencia de homólogos de la misma en otros organismos, y tal acontece en bacteriófagos, otras bacterias, arqueobacterias, plantas, invertebrados y vertebrados. La proteína homóloga de RecA en eucariotas es Rad51p. Identificada primero en levaduras a partir de mutantes sensibles a rayos X e incapaces de recombinar en meiosis, la Rad51p de *Saccharomyces* comparte un 63 % con la humana; ambas desarrollan filamentos nucleoproteicos en torno a la molécula de ADN y promueven el intercambio de cadenas. Se conocen hasta seis genes humanos homólogos del gen *Rad51*.

Todos los eucariotas poseen la proteína Dmc1p, de la familia

Rad51p/RecA, descubierta en la meiosis de la levadura. Durante la fase temprana de la meiosis, Dmc1p se ubica en los mismos sitios que Rad51p, es decir, allí donde se da la recombinación meiótica. Si falta la proteína, no se forma complejo sinaptonémico ni en levaduras ni en ratones.

Al igual que en bacterias, existen otras proteínas eucarióticas que facilitan la reacción de intercambio de cadenas. Destaca Rad52p; *in vitro* esta proteína establece contacto con RPA, homólogo funcional de la proteína SSB bacteriana, para posibilitar el ensamblaje de Rad51p en torno al ADN de cadena sencilla. Es esencial para la invasión.

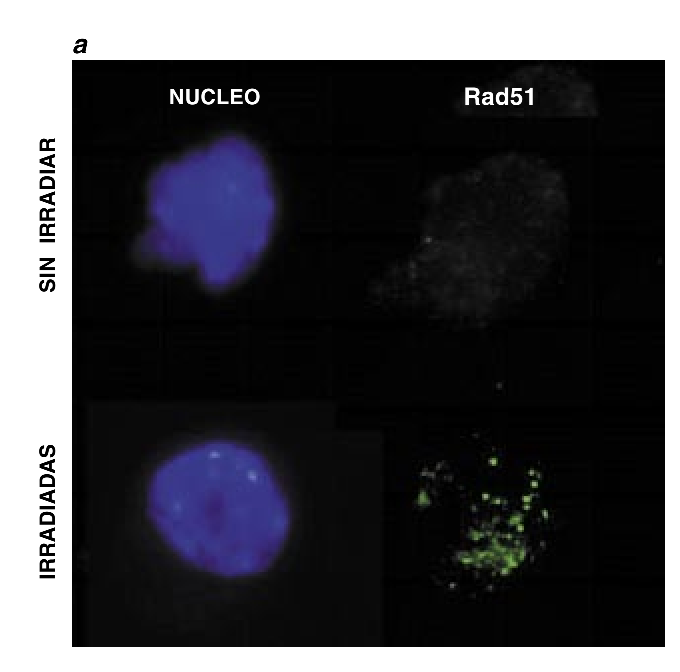
En un intercambio de cadenas catalizado por RecA/Rad51p, unos pocos emparejamientos erróneos no suponen obstáculo para la reacción. Pero si éstos son múltiples la reacción se aborta. Los experimentos de M. Radman y sus colaboradores realizados con *Salmonella typhimurium* y *Escherichia coli*, a finales de los años ochenta, demostraron que la barrera reproductiva entre estas dos especies enterobacterianas residía en la recombinación homóloga. Aunque nada les impide iniciar la conjugación, transfiriendo un segmento de ADN de la bacteria donadora a la receptora, no podrían completar la



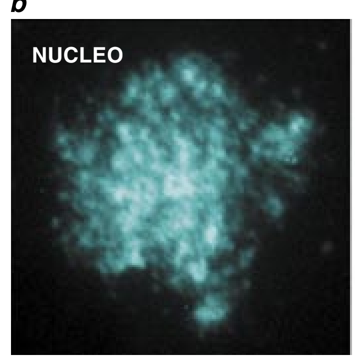
7. RECOMBINACION HOMOLOGA de acuerdo con el modelo de reparación de roturas de doble cadena de J. Szostak, T. Orr-Weaver, R. Rothstein y F. Stahl, propuesto en 1983. De las cuatro formas posibles de resolver las estructuras de Holliday (*según siga el patrón de corte marcado por las flechas blancas o negras*), sólo la mitad (*a* y *b*) da lugar al intercambio recíproco o entrecruzamiento de los marcadores distales (*cajas rojas y azules*), mientras que la otra mitad (*c* y *d*) no genera entrecruzamiento. En mitosis, podría haber otra vía de recombinación sin entrecruzamiento (*e*), a partir del intercambio de cadenas, en la que tras la síntesis parcial de ADN se reasocian las cadenas invasoras, sin que se forme o resuelva ninguna estructura de Holliday.

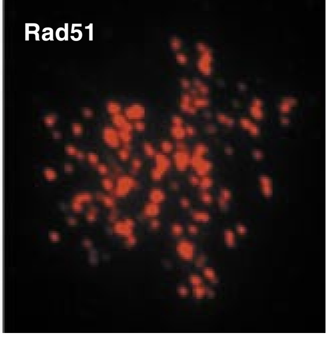
ANDRES AGUILERA

a



b





8. EL USO *in situ* de anticuerpos permite determinar la localización celular de las proteínas de recombinación así como la importancia de la recombinación homóloga en respuesta a la inducción de daños en el ADN o durante la meiosis. En células somáticas de ratón irradiadas con rayos gamma (*a*) se puede observar que Rad51p se ubica en puntos específicos dentro del núcleo (*foci*), que reflejan los lugares de reparación de los cortes de doble cadena causados en el ADN por los rayos gamma (*puntos verdes*), mientras que en células sin irradiar esos *foci* no aparecen por ser minoritaria la presencia de cortes en el ADN. Por la misma razón, las células de levaduras (*b*) presentan *foci* de la proteína Rad51p (*puntos rojos*) tras varias horas de haber iniciado la meiosis, los cuales no se observan antes de comenzar la misma. En ambos casos, el núcleo se visualiza con el compuesto fluorescente DAPI (*azul*). El color de visualización de Rad51p varía por usarse un compuesto fluorescente diferente conjugado con los anticuerpos anti-Rad51p en cada caso.

GENTILEZA DE ROLAND KANAAR (UNIVERSIDAD ERASMUS, ROTTERDAM) (*a*)
GENTILEZA DE PEDRO SAN SEGUNDO (CSIC-UNIVERSIDAD DE SALAMANCA) (*b*)

conjugación porque el ADN de la bacteria donadora difiere en un 20 % del genoma de la receptora.

En la recombinación desempeñan un papel sobresaliente las proteínas MutS y MutL, encargadas de detectar cualquier par de bases de ADN incorrectamente emparejadas y proceder a su corrección. La conjugación entre estirpes de *Escherichia* donadoras silvestres y *Salmonella* receptoras con los genes *mutS* y *mutL* inactivos multiplica por mil el rendimiento habitual. Encontramos proteínas homólogas de MutS y MutL en todos los organismos, incluida la especie humana. Gracias a ese sistema de detección de emparejamientos erróneos se abortan procesos de recombinación emprendidos entre dos secuencias divergentes. Al trabarse a múltiples emparejamientos erróneos, el sistema MutS/MutL suspende el intercambio de cadenas y evita la recombinación.

El efecto negativo del sistema de reparación de emparejamientos erróneos sobre la recombinación ha servido para demostrar la importancia de ésta en la segregación de los cromosomas en meiosis. La meiosis de los híbridos entre dos especies diferentes de levaduras, *S. cerevisiae* y *S. paradoxus*, cuyos genomas divergen en un 11-20 %, sólo produce un 1 % de esporas viables. Muchas de éstas son disómicas, es decir, retienen dos copias de algún cromosoma por culpa de una segregación errónea. Sin embargo, si se utiliza una estirpe mutante *msh2* de *S. cerevisiae*, que no fabrica la proteína Msh2p homóloga de MutS, la viabilidad de las esporas sube al 10 % en correlación con un aumento en la frecuencia de recombinación de 15 veces y una caída de la aparición de esporas disómicas. Este resultado nos dice, por un lado, que la esterilidad del híbrido se debe a la incapacidad recombinante de ambos genomas y, por otro, que éstos no recombinan porque lo impide la maquinaria de emparejamientos erróneos.

Resolución y terminación del proceso

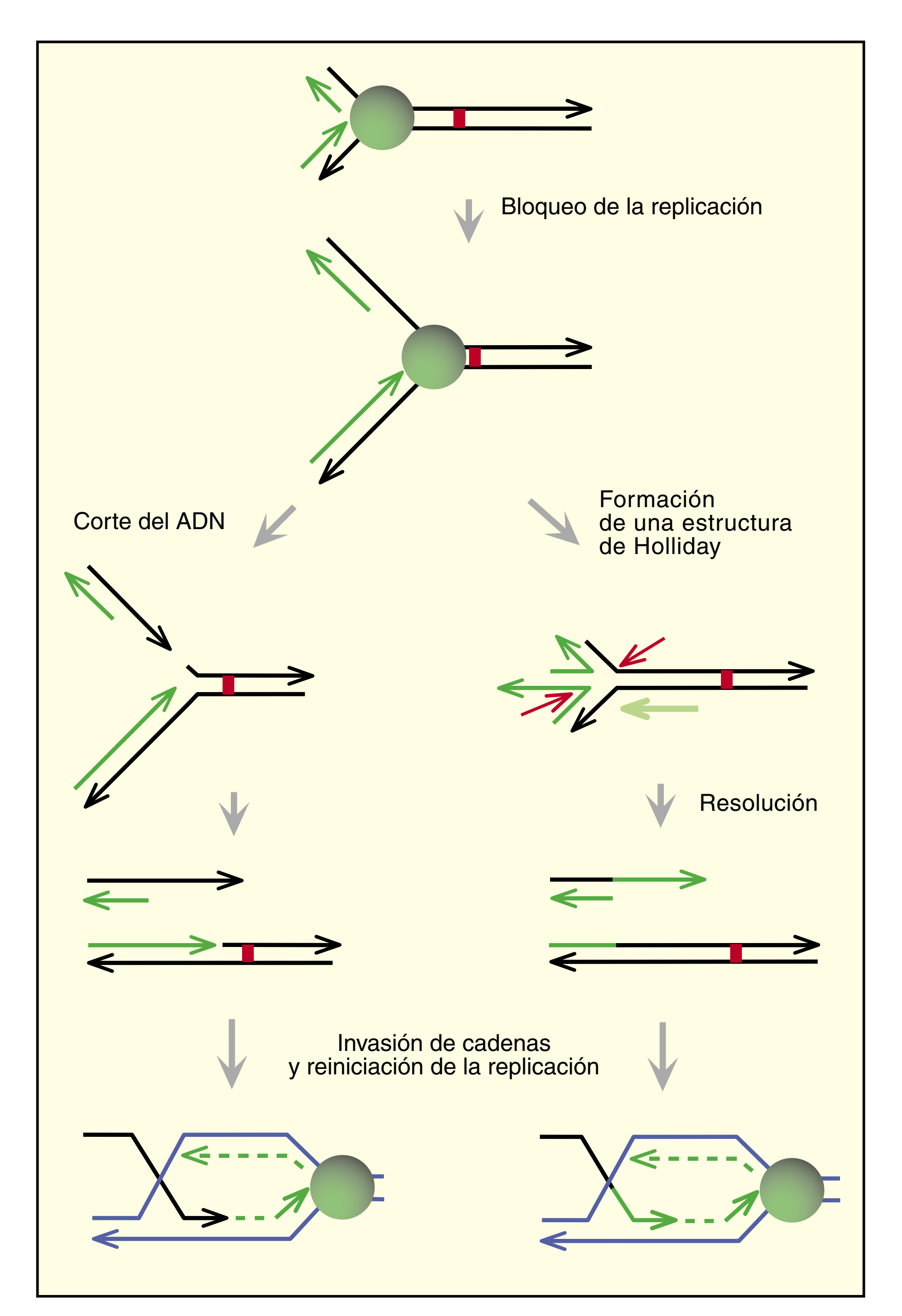
El análisis de extractos celulares de diferentes mutantes de *E. coli* por el equipo de S. West, a principios de los noventa, permitió establecer la implicación de las proteínas RuvA, RuvB y RuvC en el metabolismo de las estructuras de Holliday nacidas del intercambio de cadenas catalizado por RecA. La proteína RuvA, de 22 kilodalton, se une a las estructuras de Holliday constituida en tetrámero, que podría ser doble; además, abre la estructura de Holliday y atrae hasta ésta a la proteína RuvB, de 37 kilodalton, proporcionándole movilidad. Ambas, RuvA y RuvB, actúan en concierto como una translocasa que hace migrar a la estructura de Holliday en la misma dirección en la que se produce la invasión de cadenas por RecA.

La proteína RuvB ejerce una actividad helicasa y, en cuanto tal, tiene una estructura en forma de anillo hexamérico. De acuerdo con los estudios de microscopía electrónica del complejo RuvAB asociado a la estructura de Holliday, RuvA se dispondría en la parte central de la estructura, mientras que RuvB lo haría a la manera de dos anillos hexaméricos enfrentados y en contacto directo con RuvA. El complejo, una suerte de bomba translocadora, promueve que el ADN parental entrante salga en forma de heterodúplice por el hueco de cada anillo de RuvB.

La resolvasa, RuvC, es una proteína de sólo 19 kilodalton. Su

estructura atómica revela que opera como un dímero con dos surcos dotados de carga positiva, en los que reside la actividad nucleolítica. Dentro de los mismos debe ubicarse la estructura de Holliday. Puesto que la resolución parece ocurrir durante el movimiento de translocación catalizado por RuvAB, el resolvasoma RuvABC podría funcionar como un complejo multiproteico, capaz de translocar y resolver las estructuras de Holliday.

Aunque se ha detectado actividad resolvasa en extractos celulares eucarióticos, no se han encontrado homólogos claros de RuvABC a partir de la secuencia del genoma de levaduras u otros eucariotas. Las únicas proteínas de las que tenemos constancia de poder estar implicadas en el metabolismo de las estructuras de Holliday en eucariotas son Msh4p y Msh5p. Estas son homólogas de MutS, pero no intervienen en la reparación de emparejamientos erróneos. Las levaduras las necesitan para alcanzar los niveles normales de entrecruzamiento en meiosis; en los ratones, su ausencia provoca esterilidad por incapacidad de completar la meiosis. Puesto que la proteína MutS reconoce estructuras de emparejamientos erróneos y estructuras de Holliday, es posible que los genes *MSH4* y *MSH5* hayan divergido a partir de un homólogo eucariótico de MutS para especializarse en algún aspecto del metabolismo de las estructuras de Holliday aún por descifrar.



9. LA POLIMERASA REPLICATIVA de ADN (*esfera verde*) suele encontrarse con obstáculos (*en rojo*), como daños o proteínas unidas fuertemente al ADN, que podrían impedir su paso. Para llevar a buen fin la replicación, debe generase un extremo (*punta de la flecha*) que, gracias a la recombinación, invadirá una molécula homóloga (*azul*), normalmente la cromátida hermana, sobre la que puede volver a iniciar una horquilla completa de replicación. Se esquematizan dos formas de generar el extremo: la rotura de la cadena sencilla que hay justo detrás de la polimerasa atascada (*izquierda*) o bien la creación de una estructura de Holliday por reasociación de las cadenas recién sintetizadas (*derecha*).

La función reparadora

Tal y como propusieron Szostak, Orr-Weaver, Rothstein y Stahl, la recombinación homóloga se inicia con un corte de doble cadena. Tras cierta degradación exonucleolítica de la cadena con el extremo fosfato, la cadena con el extremo hidroxilo invade la molécula homóloga de ADN y comienza la formación de un heterodúplice con la cadena complementaria. La otra cadena, la idéntica a la invasora, al ser desplazada sirve de molde para que el extremo hidroxilo libre empiece a construir un segundo heterodúplice.

Los dos heterodúplices resultantes se propagan en sentidos opuestos. Configuración que favorece la formación de una estructura de Holliday a cada lado del sitio de iniciación. Este modelo se ajustaría a la recombinación asociada a la reproducción sexual, especialmente la meiótica.

El hecho de que los cortes de doble cadena induzcan la recombinación, lo mismo en mitosis que

El autor

ANDRES AGUILERA enseña genética en la Universidad de Sevilla. Es miembro electo de la Organización Europea de Biología Molecular. Su tema de investigación principal se centra en los mecanismos de recombinación homóloga del ADN, especialmente los relacionados con la reparación de daños en el ADN, la inestabilidad genética y la transcripción.

en meiosis, indica que la recombinación repara roturas de doble cadena. En levaduras, por ejemplo, las roturas producidas por endonucleasas que cortan el ADN se reparan con una eficiencia superior al 95 % por recombinación homóloga. Las estirpes mutantes *recA*⁻, *recB*⁻ y *recC*⁻ de bacterias y las mutantes *rad51*, *rad52* o *rad54* de eucariotas, entre otras, son incapaces de reparar las roturas provocadas por rayos X.

Además de las levaduras, las células de pollo que no fabrican Rad51p o los ratones que no sintetizan Rad54p son sensibles a rayos X. Por último, los rayos X constituyen unos excelentes inductores de recombinación homóloga y reordenaciones genéticas en levaduras, *Drosophila* y células de mamífero.

La biología celular nos ha aportado nuevas pruebas que corroboran la implicación de la recombinación en la reparación de roturas de doble cadena. En células humanas tratadas con rayos X, la proteína Rad51p aparece, junto con la proteína estabilizadora de cadenas sencillas, RPA, en múltiples puntos (*foci*), que reflejan los lugares donde se reparan las roturas, algo que no se observa en las células sin irradiar.

Mientras en la reproducción sexual la recombinación es un proceso programado que exige la acción de proteínas iniciadoras que cortan el ADN, la recombinación somática responde a la necesidad de reparar roturas cromosómicas espontáneas o inducidas por un agente químico o físico.

En la mitosis, los mecanismos de recombinación presentan características específicas importantes. Pensemos en la reacción de recombinación asociada al cambio de sexo de las levaduras. Tras un corte de doble cadena, la síntesis de ADN comienza por los dos extremos libres. Sirven de molde las cadenas de la doble hélice que invaden. Terminada la síntesis de ADN catalizada por las polimerasas, las dos cadenas invasoras nacientes se disocian de la doble hélice invadida y se reasocian entre sí, sellando así la rotura sin que ocurra entrecruzamiento alguno.

Según parece, el mecanismo que acabamos de esbozar en sus líneas esenciales constituye una vía alternativa general de reparación por recombinación de las células somáticas, distinta de la vía de la recombinación meiótica.

Las roturas cromosómicas pueden repararse también mediante un proceso de ligación no vinculado a la recombinación. Esta vía, que sella directamente los extremos libres de las roturas, adquiere importancia en las fases del ciclo celular anteriores a la replicación del ADN, cuando no existe todavía una cromátida hermana que pueda aportar el molde para la reparación por recombinación. Esto explica que la recombinación mitótica acontezca preferentemente después de la replicación cromosómica.

Pero la recombinación también tiene un papel primordial en replicación. Cuando se oponen obstáculos físicos al paso de la polimerasa replicativa (roturas de una cadena, dímeros de bases producidos por la luz ultravioleta o complejos proteicos), el extremo libre que se genera en virtud del bloqueo puede invadir la cromátida hermana o el cromosoma homólogo. A partir de ese extremo, la polimerasa replicativa reinicia la síntesis sobre el ADN molde invadido. En *E. coli* este proceso se completa con el ensamblaje de la horquilla de replicación. En el proceso interviene también el dímero RuvAB, lo que sugiere que se forma una estructura de Holliday como paso previo a la reiniciación.

Sabemos que la proteína Rad51p de mamíferos se expresa fundamentalmente en órganos y tejidos con intensa proliferación celular (timo, bazo o testículos). Apoyándose en tales resultados, se sospecha de la asociación de la maquinaria de recombinación con los mecanismos replicativos para realizar la función reparadora.

Perspectivas futuras

Conocidas las proteínas centrales de la recombinación, podría, en principio, reconstruirse la reacción *in vitro*. Pero estamos lejos de dominar los pormenores de la reacción, especialmente en eucariotas superiores. Para hacernos una idea de la situación en que nos encontramos es suficiente resaltar la siguiente paradoja: aunque Rad51p cataliza el paso central de la recombinación eucariótica, aún se detecta recombinación mitótica en estirpes mutantes de levadura carentes de esta proteína.

Nos quedan todavía por identificar las endonucleasas y exonucleasas que participen en la iniciación, las helicasas que faciliten el desplazamiento del heterodúplice, las topoisomerasas que eliminen la superhelicidad generada durante el proceso, otras proteínas del metabolismo de las estructuras de Holliday, las polimerasas que rellenen los huecos de ADN, las proteínas remodeladoras de la cromatina que faciliten la accesibilidad de las demás proteínas, etc. En eucariotas superiores, la existencia de familias de proteínas estructuralmente conservadas, como la familia Rad51p, nos exige, además, entender la función específica de cada proteína.

Gracias a la investigación con eucariotas multicelulares y animales de laboratorio desprovistos de funciones de recombinación comenzamos a descubrir la función que las proteínas de recombinación cumplen en diferentes tejidos celulares, en diferentes estadios del desarrollo o en fertilidad.

Al propio tiempo, aparecen nuevos fenómenos asociados a la recombinación. Por citar uno, la letalidad de los ratones homocigóticos *rad51*⁻/*rad51*⁻, que no pasan de las primeras divisiones del embrión. Dada la fuerte proliferación de las células embrionarias, Rad51p podría participar en el desarrollo de los mamíferos a través de alguna función aso-

ciada a replicación, restableciendo horquillas atascadas. Sin embargo, no podemos descartar que Rad51p tenga una función adicional relacionada con otros procesos biológicos. Sorprendentemente, la proteína se ha identificado también asociada a la holoenzima de la polimerasa de ARN de mamíferos. También parece ser necesaria para la función de los genes supresores de tumores mamarios *BRCA1* y *BRCA2* con los que interacciona.

Nuestra idea de la importancia de la recombinación homóloga en la vida de los organismos ha ido cambiando a lo largo de los años. Su interés como fuente de variación y como mecanismo asegurador de la segregación reductora de los cromosomas en meiosis ha sido la pauta dominante de la mayoría de las investigaciones desarrolladas. Hoy se reconoce su implicación en la reparación de roturas de doble cadena del ADN y en la resolución de horquillas de replicación bloqueadas.

Pese a representar el mismo fenómeno biológico y recurrir a parejos mecanismos y proteínas idénticas, la recombinación "somática" y la recombinación "sexual" han sufrido un proceso de especialización funcional, que puede conllevar el uso de factores adicionales distintos. Nos encontramos ante un proceso biológico universal, pero con múltiples manifestaciones. Surgida como una actividad reparadora, asociada a la replicación del ADN, la recombinación homóloga adquirió un papel adicional en la reproducción sexual que ha marcado los mecanismos de la herencia y la evolución de los seres vivos.

Bibliografía complementaria

GENETIC RECOMBINATION. R. Kucherlapati y G. R. Smith. ASM Press, Washington, D.C., 1988.

GENETIC RECOMBINATION. D. R. Leach. Blackwell Science, 1996.

RECOMBINATIONAL REPAIR OF DNA DAMAGE IN *ESCHERICHIA COLI* AND BACTERIOPHAGE. A. Kuzminov, en *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, vol. 63, págs. 751-813. ASM Press, Washington, D.C., 1999.



WILLIAM PELLETIER *Photo Services, Inc.*, CORTESIA DE LA UNIVERSIDAD DE MICHIGAN

Luz extrema

Enfocar luz con la potencia de mil grandes centrales hidráulicas sobre un punto del tamaño del núcleo de una célula acelera los electrones hasta la velocidad de la luz en un femtosegundo

Gérard A. Mourou y Donald Umstadter

El sueño de intensificar la luz es tan antiguo como la misma civilización. Cuenta la leyenda que Arquímedes concentró los rayos solares mediante un espejo gigante sobre la flota romana en Siracusa, en el año 212 a.C., y la destruyó. Aunque esta historia carece de fundamento, es cierto que alrededor del 200 a.C. otro griego, Diocles, inventó el primer dispositivo focalizador ideal: un espejo parabólico. Dos mil años después se conjugaron los espejos y la mecánica cuántica para construir las fuentes de luz intensa más versátiles: los láseres.

Nova fue el láser de alta potencia por antonomasia. Funcionó en el Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore desde 1985 hasta 1999. Su nombre aludía al brillo de las explosiones de estrellas. Fue uno de los mayores láseres jamás construidos. Diez cadenas paralelas de amplificadores láser cubrían 90 metros; espejos formados por bloques de 160 kilogramos de vidrio dirigían los haces hacia unos blancos. Entre otras cosas, sirvió para experimentar con la fusión nuclear. Funcionaba sólo unas pocas veces al día porque había que evitar que se sobrecalentase. Tanta potencia requería mucha energía.

Como la potencia es la *velocidad* a la que se transfiere la energía, otra manera de alcanzar una potencia excepcional consiste en dar una cantidad de energía modesta en un intervalo de tiempo cortísimo. Los impulsos usuales del Nova eran largos en comparación con los de los láseres ultrarrápidos de hoy en día —duraban tres nanosegundos—; cada uno exigía algunos kilojoule de energía. Con impulsos 10.000 veces más cortos, un nuevo tipo de láser que se puede instalar en una mesa suministra una potencia similar a la del Nova [*véase* "Láser de pulsos ultracortos", por John-Mark Hopkins y Wilson Sibbett; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre 2000]. Un láser de potencia ultraalta que libere tan sólo, digamos, un joule en un impulso de 100 femtosegundos (10^{-13} segundos), llega a los 10 billones de watt (10^{13} W, 10 terawatt), potencia superior a la suministrada por todas las centrales de energía del mundo juntas.

Estos láseres compactos pueden dispararse cien millones de veces al día, concentrar su potencia en un punto del tamaño de una micra y producir las intensidades de luz más elevadas de la Tierra. Asociados a estas gigantescas densidades de energía están los mayores campos eléctricos que jamás se hayan producido, del orden de un billón de volt por

1. EL LASER DE MESA dispara, diez veces por segundo, impulsos de varios terawatt que inciden sobre una tela fina situada en primer plano. La fotografía se ha tomado con una triple exposición para captar la gama entera de intensidades.

centímetro. La interacción entre la materia y una luz de láser tan intensa recrea unas condiciones físicas extremas que sólo se encuentran en los centros de las estrellas o en la vecindad de un agujero negro: las mayores temperaturas, 10^{10} kelvin; los mayores campos magnéticos, 10^9 gauss; las mayores aceleraciones de partículas, 10^{25} veces la gravedad de la Tierra.

Estos láseres, que no cuestan cientos de millones de euros, sino sólo del orden de un millón, van devolviendo la "gran ciencia" a los laboratorios universitarios ordinarios y a los países con presupuestos de investigación limitados. En los últimos años se han construido docenas de sistemas así en distintos lugares del mundo; con ellos se investigan varias especialidades de la física (física nuclear, astrofísica, física de altas energías, relatividad general). Ya han aparecido aplicaciones: láseres de rayos X, aceleradores de partículas de dimensiones muy reducidas y radiografías clínicas de precisión. También se espera mucho de ellos como fuente de radiaciones terapéuticas y medio para la generación de energía por fusión nuclear.

El truco

En los cinco años siguientes a la invención del láser en 1960, los láseres de mesa progresaron gracias a una serie de avances técnicos hasta alcanzar una potencia de un gigawatt (10^9 W). Durante los 20 años siguientes la evolución se estancó; dejó de crecer la potencia máxima de los sistemas de láseres de mesa. La única manera de aumentar la potencia fue construir láseres cada vez mayores. El intento de operar más allá de la intensidad límite creaba efectos no lineales indeseados en los componentes del láser; empeoraba la calidad del haz e incluso estropeaba los componentes. Sólo se superó este problema del daño óptico hacia 1985, con la introducción de la amplificación de los impulsos "con trinos" (AIT) por parte del grupo de investigación que dirigía uno de nosotros (Mourou). La potencia de los láseres de mesa se incrementó en factores de entre 10^3 y 10^5.

Se llama "trino" de una señal o una onda a su alargamiento en el tiempo. En la amplificación de la onda con trinos, el primer paso consiste en producir un impulso corto mediante un oscilador y dilatarlo entre 10^3 y 10^5 veces (*véase el recuadro* "Amplificación de impulsos con trinos"). Esta operación hace decrecer su intensidad en la misma cantidad. A continuación se pueden ya aplicar al impulso las técnicas ordinarias de amplificación de los láseres. Finalmente, un dispositivo robusto, un par de redes de difracción en el vacío, recomprime el impulso hasta devolverle su duración original. Acaba así teniendo una potencia entre 10^3 y 10^5 veces mayor que el límite del amplificador. Un ejemplo típico empezaría con un impulso semilla de 100 femtosegundos y 0,2 nanojoule de energía. Lo alargaríamos en un factor de 10^4 hasta un nanosegundo (reduciendo su potencia de unos 2 kilowatt a 0,2 watt) y lo amplificaríamos 10 órdenes de magnitud hasta 2 joule y 2 gigawatt. La recompresión del pulso a 100 femtosegundos aumentaría la potencia hasta 20 terawatt. Sin esta técnica, el envío del pulso original de 2 kilowatt a un amplificador de mesa destruiría el amplificador, a menos que incrementásemos su sección 10^4 veces y dispersáramos el haz a su través. Con la técnica AIT se usan amplificadores de láser tradicionales y no se sobrepasa el punto en que aparecen los efectos no lineales.

Perfeccionar la AIT costó bastante. Los dispositivos típicos con que se comprimen o alargan los pulsos no suelen actuar de una manera lineal; para alcanzar el resultado deseado hay que ajustar con precisión las propiedades del "trinador" y del compresor.

En años recientes ha habido un nuevo aumento de las intensidades con el desarrollo de dispositivos ópticos correctivos que concentran los haces de láser sobre puntos de tamaños mucho menores. Con estos y otros progresos en las técnicas de compresión se han obtenido impulsos que poseen la máxima intensidad posible para una energía luminosa determinada.

Los aumentos de la potencia y la intensidad en los años noventa han abierto un nuevo régimen de las interacciones entre la luz y la materia, la óptica relativista, donde la luz acelera los electrones hasta cerca de su propia velocidad. Antes de la AIT, este régimen sólo podía alcanzarse mediante láseres muy grandes y caros.

Resumen/*Luz extrema*

- Hacia mediados del decenio de los ochenta del siglo pasado, se inventó un método de amplificación láser sobre cuya base surgió una nueva generación de láseres de mesa que crean impulsos muy breves de luz intensísima.
- Una luz de tal intensidad ofrece nuevos tipos de interacción con la materia. Propulsa a los electrones hasta velocidades cercanas a la de la luz en sólo femtosegundos. La aceleración que los láseres operan en las partículas multiplica por 10.000 la alcanzada por éstos en los aceleradores.
- Entre las posibles aplicaciones están la toma de imágenes médicas de alta resolución, la radioterapia de precisión a bajo coste, la fusión nuclear y la investigación en numerosas especialidades de la física.

Optica relativista

La óptica se ocupa de la respuesta de los electrones a la luz. Esta definición quizá case mal con la idea que muchos se hacen de la palabra, que les recuerda la luz que se refleja en los espejos o se refracta en el agua de una piscina. Pero todas las propiedades ópticas de un material son una consecuencia de la manera en que la luz interacciona con sus electrones.

La luz es una onda formada por campos eléctricos y magnéticos acoplados que oscilan en sincronía a frecuencias muy elevadas, perpendicularmente entre sí y a la dirección de propagación de la luz (*véase el recuadro* "La interacción de la luz y la materia"). Cuando un electrón encuentra una onda luminosa de una potencia corriente, el campo eléctrico de la onda le aplicará una fuerza, que hará que oscile en la misma di-

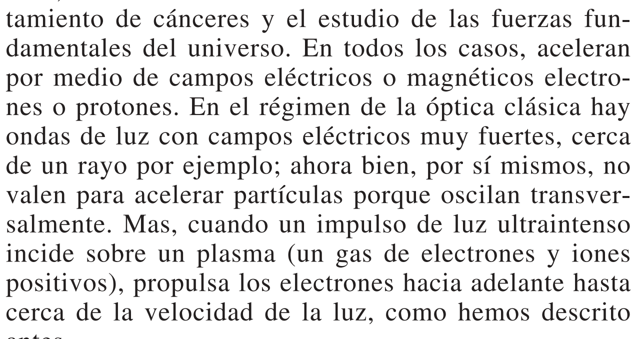
rección y con la misma frecuencia que el campo, pero no en la misma fase. Dependiendo de cómo el electrón esté ligado a los átomos del material, sus oscilaciones podrán retrasarse o adelantarse respecto a las de la onda luminosa. Las amplitudes y fases de las oscilaciones de los electrones determinan la propagación de la onda de luz por el material; así se establecen las propiedades ópticas de éste.

En la óptica clásica, las amplitudes son pequeñas; las velocidades a que oscilan los electrones se hallan muy lejos de la velocidad de la luz. Sin embargo, con la generación de intensidades de láser superiores a 10^{18} watt por centímetro cuadrado la velocidad de las oscilaciones se ha aproximado a la de la luz; los consiguientes efectos relativistas cambian la naturaleza misma de la respuesta de los electrones a la iluminación.

En primer lugar, una velocidad elevada aumenta la masa del electrón, lo que afecta a la amplitud y fase de sus oscilaciones. Y más importante aún: comienza a adquirir relieve el campo magnético de la onda luminosa. Un campo magnético ejerce una fuerza sobre una carga eléctrica sólo cuando la carga está en movimiento. En el régimen de la óptica clásica la fuerza magnética es despreciable, pero cuando las velocidades de oscilación de los electrones se acercan a la de la luz, curva su trayectoria y les confiere un momento enorme en la dirección del haz luminoso. Este efecto desempeña un papel central en la óptica relativista.

Podemos prescindir de la interacción entre la luz y los núcleos atómicos ya que los protones tienen casi 2000 veces la masa de los electrones y, por tanto, oscilan mucho menos. A determinadas intensidades, sin embargo, la luz impele los protones también a velocidades relativistas. A este régimen podría llamársele óptica nuclear, debido a la gran variedad de procesos nucleares, la fusión entre ellos, que genera.

De 0 a 60 MeV en un milímetro

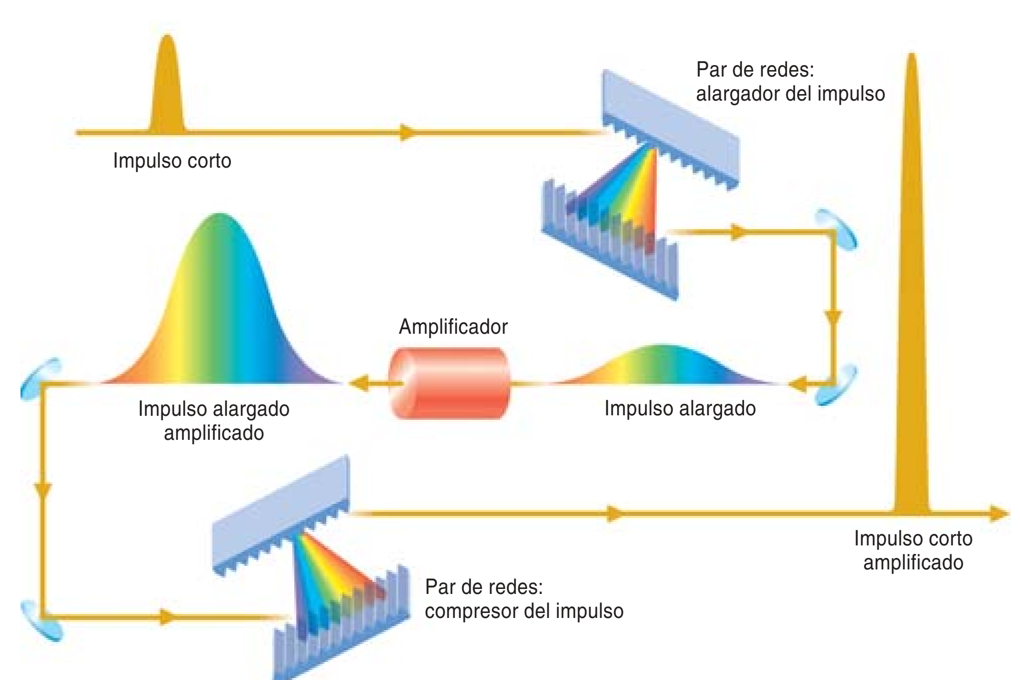


En la aceleración de partículas se encuentra la aplicación más clara de la fuerza relativista de un haz de láser ultraintenso. Los aceleradores de partículas cargadas tienen numerosos usos, de los tubos de televisión al tratamiento de cánceres y el estudio de las fuerzas fundamentales del universo. En todos los casos, aceleran por medio de campos eléctricos o magnéticos electrones o protones. En el régimen de la óptica clásica hay ondas de luz con campos eléctricos muy fuertes, cerca de un rayo por ejemplo; ahora bien, por sí mismos, no valen para acelerar partículas porque oscilan transversalmente. Mas, cuando un impulso de luz ultraintenso incide sobre un plasma (un gas de electrones y iones positivos), propulsa los electrones hacia adelante hasta cerca de la velocidad de la luz, como hemos descrito antes.

Los iones positivos del plasma, miles de veces más pesados que los electrones, se quedan atrás. Esta separación de cargas positivas y negativas crea un campo eléctrico elevado que cabe aprovechar para acelerar otras partículas. La región de campo eléctrico intenso atraviesa el plasma como una onda que sigue la estela del impulso de luz. Las partículas cargadas se aceleran hasta adquirir importante energía en los campos de la estela de un láser tal y como los delfines ganan energía nadando en fase con la onda de agua de la es-

AMPLIFICACION DE IMPULSOS CON TRINOS

El mecanismo fundamental de los láseres de mesa de intensidad ultraalta reside en la "amplificación de impulsos con trinos". Sirviéndonos de un par de redes de difracción podemos alargar, en un factor de 10^4, un breve impulso de láser. Puesto que la intensidad del impulso extendido es baja, puede aumentarse con un pequeño amplificador láser. A continuación, un segundo par de redes recomprime el pulso; alcanzará así una intensidad 10^4 veces el pico que el amplificador podría haber soportado.



JUAN VELASCO

tela de un barco. Propusieron en 1979 la idea de un acelerador basado en el campo de estela de un láser Toshiki Tajima y John M. Dawson, ambos por entonces en la Universidad de California en Los Angeles.

La conversión del campo eléctrico oscilante del impulso de luz en un campo de estela que apunta siempre en una dirección recibe el nombre de rectificación, por analogía con los rectificadores electrónicos que convierten la corriente alterna en corriente continua. Los aceleradores lineales tradicionales, el de Stanford (SLAC) por ejemplo, se valen de cavidades metálicas para rectificar las ondas de radiofrecuencia a fin de "impulsar" repetidas veces las partículas cargadas a lo largo de la línea del haz. (Las ondas de radio son ondas electromagnéticas como las de la luz, pero con frecuencias mucho menores y longitudes de onda mayores.) El acelerador de Stanford ha de tener tres kilómetros de largo para alcanzar las energías que se desean porque el campo acelerador de cada cavidad es reducido. Sería mayor si se empleasen ondas de radio de mayor intensidad y longitudes de onda más cortas, pero la cavidad restringe ambas propiedades: su tamaño acota la longitud de onda y las intensidades elevadas provocan la ruptura electrónica de las paredes metálicas (se generan chispas). Los aceleradores de campo de estela de láser evitan estos dos límites al eliminar las cavidades. Con impulsos de máxima intensidad se aceleran las partículas directamente, de la misma manera que el haz crea electrones relativistas; puede prescindirse del plasma.

En los últimos años, los aceleradores de electrones y protones basados en láseres han producido haces de energías superiores a los 50 millones de electronvolt (MeV), comparables a los de una etapa (de unos metros de largo) de un acelerador tradicional. El sistema láser alcanza la misma energía en un milímetro.

La aceleración rápida con altos gradientes tiene ventajas. Por ejemplo, uno de nosotros (Umstadter) ha

LA INTERACCION DE LA LUZ Y LA MATERIA

OPTICA RELATIVISTA

En la luz de intensidad normal (*a*), su campo eléctrico (*ondas rojas*) determina que los electrones oscilen a velocidades moderadas. Cuando la intensidad es altísima (*b*), esas partículas oscilan a una velocidad próxima a la de la luz, en cuya situación el campo magnético de la luz (*ondas azules*) los impele hacia delante con una cantidad de movimiento ingente.

a

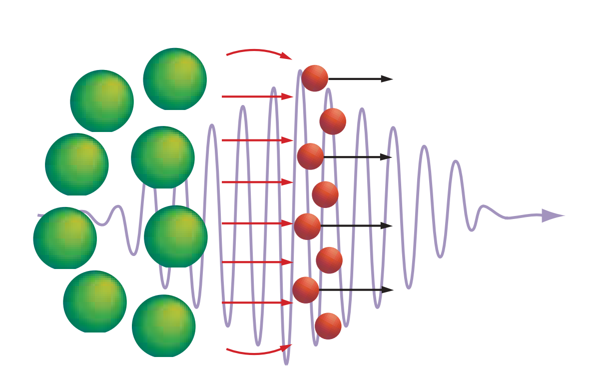
b

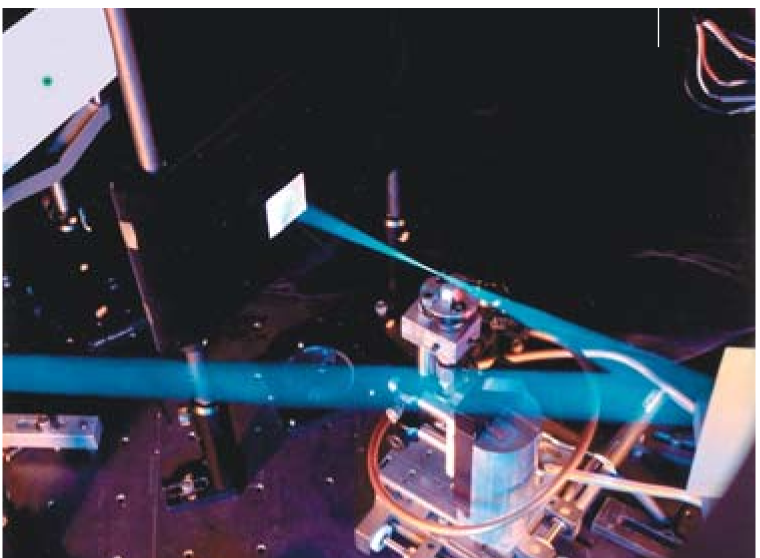
Campo eléctrico

Campo magnético

ACELERACION POR CAMPO DE ESTELA

Cuando una luz muy intensa incide sobre un plasma (*abajo*), imparte a los electrones velocidades elevadas. Los iones positivos, más pesados (*verde*), se quedan rezagados. Entre estas cargas así separadas se genera un intenso campo eléctrico (*líneas rojas*). La separación de cargas y el campo eléctrico asociado avanzan en la estela de la luz y pueden acelerar otras partículas dotadas de carga hasta energías muy altas.





UN IMPULSO DE LASER DE INTENSIDAD *ULTRAALTA (azul)* enfocado sobre un chorro de gas helio mediante un espejo parabólico acelera los electrones del gas hasta 60 MeV en el intervalo de un milímetro. Una pantalla *fluorescente (arriba a la izquierda)* detecta el haz de electrones de alta energía.

NINA FINKEL (*ilustraciones*); WILLIAM PELLETIER *Photo Services, Inc.*, Y DONALD UMSTADTER, CORTESIA DE LA UNIVERSIDAD DE MICHIGAN (*fotografía*)

construido haces de electrones de unos millones de electronvolt cuyo “brillo” (en pocas palabras, la concentración de partículas en el haz) supera el de los haces de los aceleradores tradicionales; las cargas empaquetadas en un impulso del haz disponen de menos tiempo para separarse empujadas por sus propias fuerzas electrostáticas. Además, los aceleradores láser de bajo coste cumplen muchas funciones de los aceleradores tradicionales, así la producción de radioisótopos de vida corta para el diagnóstico médico y la de haces de neutrones y positrones para el estudio de materiales.

Sin embargo, el intervalo que cubren las energías de las partículas en los haces creados por los sistemas láser es más bien ancho, inadecuado para algunas aplicaciones. Además, los sistemas tradicionales encadenan numerosas etapas aceleradoras, como sucede en los tres kilómetros del SLAC y en los siete del anillo principal del Tevatrón, en el Fermilab. Las investigaciones en curso sobre los sistemas de aceleración por láser se centran en que la energía del haz se disperse menos y en aumentarla por medio de etapas múltiples. También se está explorando el uso de guías de ondas para incrementar la distancia en que los campos de estela pueden acelerar las partículas.

La frontera de las altas energías

No esperamos que los aceleradores láser reemplacen a los tradicionales en el Tevatrón y otras instalaciones de la física de altas energías. Más bien complementan y potencian los sistemas actuales. Presentan características que los hacen útiles para determinadas aplicaciones y experimentos de nuevo cuño. El de la aceleración de partículas inestables constituye un terreno atractivo.

El Tevatrón representa la frontera actual de las altas energías: la producción de colisiones de protones a energías de teraelectronvolt. Su sucesor, el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, también acelerará protones. Los choques de este tipo resultan muy complicados y desordenados porque un protón es una aglomeración de quarks y gluones, partículas cuyas fuerzas ejercidas son interacciones fuertes. Más elemental resulta la estructura de los electrones y los positrones; en consecuencia, los choques provocados son mucho más “limpios”; vale decir, podemos abordar un estudio más detallado y preciso de tales colisiones. Pero en este segundo caso, la aceleración entraña un problema: en razón de su ligereza característica, tales partículas pierden demasiada energía en forma de radiación de sincrotrón conforme van describiendo trayectorias en un acelerador circular.

Ante el dilema así planteado, podríamos optar por acelerar muones. Doscientas veces más pesados que los electrones, las pérdidas sincrotrónicas experimentadas por los muones se cifran en la millonésima de aquéllos. Pero ofrecen un inconveniente, su inestabilidad. En promedio, los muones se desintegran en algo más de dos microsegundos. Podrían emplearse láseres de alta intensidad para acelerar muones hasta que alcanzaran casi la velocidad de la luz en una pequeña fracción de su tiempo de vuelo. Obtenida esa celeridad, vendría en nuestra ayuda la dilatación temporal relativista; extiende ésta la vida media del muon en proporción a la energía alcanzada y alarga, pues, el tiempo en que un acelerador tradicional puede actuar sobre la partícula. La ventaja aportada por la rápida aceleración lasérica aumentaría con el pion, que se desintegra, en promedio, en sólo 26 nanosegundos.

No acaban ahí las posibilidades que ofrece el empleo de láseres de ultraalta potencia. Podemos aplicarlos a las colisiones entre rayos gamma. Abreviadamente, choques gamma-gamma. Los rayos gamma son fotones de energía altísima; si se prefiere, luz de una frecuencia muy elevada, que cae más allá de los rayos X en el espectro. Al chocar con un haz de electrones de alta energía, un haz láser de alta potencia origina un haz angosto de rayos gamma. Se produce la llamada dispersión Compton, proceso en el que los fotones del láser rebotan en los electrones. La energía de los rayos gamma depende, sobre todo, de la energía del haz de electrones. Por dar una cifra, un haz de electrones de 250 gigaelectronvolt (GeV) lleva la energía de los fotones desde el escueto electronvolt (luz visible) hasta unos 200 GeV.

Cuando se produce una colisión entre dos haces de rayos gamma, las interacciones son más limpias que en los choques entre un electrón y un positrón o entre un muon y un antimuón. Se trata de un proceso inverso al operado en la aniquilación materia-antimateria, donde las partículas se funden y convierten en un destello de radiación. En un choque de fotones, por el contrario, se crean pares de partículas y antipartículas. Ahora bien, sólo con láseres de intensidad ultraalta hay, en cada impulso, un número suficiente de fotones para producir colisiones gamma-gamma en cuantía importante. En 1997, un equipo constituido por físicos del SLAC y de las universidades de Rochester, Princeton y Tennessee ejecutaron una variante de este sistema y generaron pares electrón-positrón mediante colisiones de rayos gamma y fotones láser. Hoy en día, todos los colisionadores lineales de partículas tienen en su agenda proyectos de experimentos gamma-gamma que complementen los habituales electrones-positrones.

Diagnóstico y terapia del cáncer

En el diagnóstico y terapia del cáncer podrían hallar campo de aplicación los aceleradores de partículas dotados de carga operados por láser; con ellos, en efecto, puede generarse una radiación, muy penetrante, de rayos X o de haces de partículas. Desde hace más de un siglo se vienen utilizando los rayos X

Los autores

GERARD A. MOUROU y DONALD UMSTADTER participan en la fundación del Centro de Optica Ultrarrápida de la Universidad de Michigan en Ann Arbor. Mourou, director del centro, enseña ingeniería eléctrica; Umstadter, es profesor asociado de ingeniería nuclear y eléctrica.



2. RADIOGRAFIA DE UNA RATA. Pone de manifiesto el alto grado de resolución que puede lograrse con los rayos X generados al enfocar un láser de mesa de intensidad ultraalta sobre un pequeño punto de un plasma.



en la práctica médica. Los tubos tradicionales de rayos X aceleran los electrones en un campo eléctrico que actúa entre un cátodo y un ánodo. Cuando los electrones chocan contra el ánodo, sufren una brusca deceleración y se emiten copiosos rayos X. La resolución está limitada por el tamaño de la fuente de los rayos X, en este caso el ánodo, que suele medir unas 100 micras; por eso, mediante ese sistema no podemos detectar tumores inferiores al milímetro de diámetro.

Resulta harto sencillo el mecanismo en cuya virtud un láser de intensidad ultraalta genera rayos X. Basta enfocarlo sobre un metal apropiado. El haz acelera los electrones próximos a la superficie del blanco hasta energías elevadas; al atravesar el metal se frenan y emiten rayos X en abundancia. Si se enfoca el láser sobre un punto de unas pocas micras, se crea una fuente de rayos X minúscula, capaz de detectar agrupaciones mínimas de células cancerosas. De ese modo, el tratamiento puede empezar en una etapa precoz del tumor. Nada impide, en principio, conseguir una resolución de una micra, algo más que la longitud de onda del láser en cuestión. Se han construido ya sistemas de rayos X de este tipo en las universidades de Stanford y Lund, así como en el Instituto Nacional de Investigaciones Científicas de Quebec.

En radioterapia, la precisión importa sobremanera. Se pretende conjugar la aplicación de la máxima dosis con el menor daño inferido a los tejidos sanos que rodean al tumor. Cuando el cáncer afecta al cerebro o la médula espinal, regiones sumamente delicadas, reviste interés fundamental acertar en depositar cantidades controladas de radiación en áreas restringidas y bien delimitadas. Para esta misión, resultan muy adecuados protones y iones de carbono. A diferencia de electrones y fotones, esas partículas más pesadas sufren una dispersión lateral mínima; su haz, pues, no se ensancha. Pierden energía a un ritmo constante, muy bajo, a lo largo de su recorrido, lo que les permite depositar en el blanco la mayor parte de su energía; para una energía inicial determinada, esto sucede a una distancia bien determinada dentro del tejido. Con esas partículas se logra una precisión mucho mayor que con los electrones y los fotones a la hora de administrar la dosis en un tumor profundo.

En varios países se están haciendo ensayos clínicos con haces de protones y de carbono. Sin embargo, el uso a gran escala de la terapia mediante partículas tropieza con el elevado coste de los aceleradores tradicionales. Por botón de muestra, la construcción del Acelerador Médico de Iones Pesados de Chiba, en Japón, cuesta alrededor de 300 millones de euros. Puede tratar sólo a unos 200 pacientes al año, una pequeña fracción de quienes se beneficiarían de esta técnica de oncoterapia. Ahora, los aceleradores con impulsión por láser imparten a los iones energías que se quedan cortas en un factor cinco; además, adolecen de una dispersión excesiva. Si se superasen ambos inconvenientes, dispondríamos de una radioterapia iónica a un coste mucho más bajo, para beneficio de un número mayor de pacientes.

Un impulso de un láser de intensidad ultraalta suministra la potencia que producen hoy, juntos, los generadores del mundo. Pero esa cota de igualdad podría superarse en el futuro. Los láseres de ese tipo podrían convertirse en un componente esencial de las centrales de fusión nuclear y cubrir una parte de las necesidades energéticas del planeta. Hace decenios que se persigue la generación de energía por medio de la fusión nuclear controlada, sin resultados palpables. En los últimos años ha venido ganando predicamento la fusión por confinamiento inercial, procedimiento en el que decenas o centenares de intensos impulsos de láser inciden simultáneamente y desde todos los lados sobre cápsulas de combustible, mezcla de deuterio y tritio (isótopos pesados del hidrógeno). Los láseres comprimen y calientan las cápsulas hasta las densidades y temperaturas, extremas, a las que los núcleos de deuterio y de tritio se fusionan, forman helio y liberan grandes cantidades de energía. El gran láser Nova de Livermore fue uno de los principales instrumentos en este tipo de investigaciones.

La energía total que suministran los láseres de intensidad ultraalta portátiles no basta para provocar la fusión termonuclear. Ahora bien, en conjunción con artilugios del tamaño del Nova podrían adelantar el día en que resulten viables desde un punto de vista económico y técnico. Para que la compresión de cáp-

sulas cebe la fusión, ha de conseguirse una implosión sumamente simétrica. Cualquier fallo mínimo arruina el proceso. En la nueva técnica pergeñada en Livermore, corresponderá todavía a los grandes láseres el trabajo duro de comprimir el combustible hasta que adquiera la densidad necesaria, pero no tendrán además que generar la temperatura de ignición. Cerca del punto de máxima densidad, un impulso brevísimo de iones, acelerado por un láser compacto AIT de potencia ultraalta, incide sobre la cápsula de implosión; viene a ser como la bujía en el motor de un coche: crea un punto de intenso calor que enciende una onda de fusión, y ésta se propaga por el resto de la cápsula. A través de este método debería reducirse la dificultad, inmensa, de los requisitos técnicos necesarios para cebar la fusión mediante la mera implosión; debería también aumentar mucho el cociente entre la energía producida y la invertida.

En el Laboratorio Rutherford y Appleton de Oxfordshire y en la Universidad de Osaka se han llevado a cabo algunos de los pasos fundamentales de la ignición rápida. Pero como sucede siempre en los trabajos sobre la fusión, habrá que dar muchos más antes de que se demuestre la viabilidad de este método en cuanto procedimiento para la generación económica de energía. Se convierta o no en una realidad esta aplicación, la luz concentrada tiene un futuro espectacular y variopinto. Ni soñarlo habrían podido Arquímedes y Diocles.

Bibliografía complementaria

TERAWATT LASERS PRODUCE FASTER ELECTRON ACCELERATION. D. Umstadter en *Laser Focus World*, páginas 101-104; febrero 1996.

ULTRAHIGH-INTENSITY LASERS: PHYSICS OF THE EXTREME ON A TABLETOP. G. A. Mourou, C. P. J. Barty y M. D. Perry en *Physics Today*, vol. 51, n.º 1, páginas 22-28; enero 1998.

REVIEW OF PHYSICS AND APPLICATIONS OF RELATIVISTIC PLASMAS DRIVEN BY ULTRAINTENSE LASERS. D. Umstadter in *Physics of Plasmas*, vol. 8, n.º 5, páginas 1774-1785; mayo 2001.

Replanteamiento del mercado ecológico

La compra “verde” no es suficiente para salvaguardar la biodiversidad en los trópicos. Podría serlo la comercialización de servicios ecológicos

Jared Hardner y Richard Rice

En Europa y Norteamérica se ha querido contribuir a la conservación de los bosques tropicales con la distribución comercial de madera o café que cuenten con certificados de que su producción respetó el medio. Estos productos verdes merecen nuestro apoyo. Uno de los más conocidos es el “café de sombra”, llamado así por hallarse el cafetal en la umbría del sotobosque y no en campos soleados donde se han talado todos los árboles.

Pero en el contexto de la economía global, la agricultura viable y las acciones de los consumidores no bastarán, por sí solas, para lograr la conservación de la flora y la fauna más amenazadas por la deforestación. Estamos convencidos de que otra manera de proceder, nueva y osada, el “sistema de concesiones de conservación”, abre una posible vía para una gran expansión del mercado “verde”: no limitarse a los meros productos, sino abarcar una noción más amplia, la de “servicios ecológicos”, la adquisición directa de la preservación de la biodiversidad.

La viabilidad de tal estrategia se funda en consideraciones económicas. En el mundo subdesarrollado se están arrendando enormes parcelas de bosque público a no más de un 1 euro por hectárea al año. Con tales precios, las organizaciones ecologistas, que desde largo atrás han demostrado su disposición a subsidiar la conservación de la biodiversidad, pueden permitirse pujar más que los competidores por los arrendamientos de esas tierras y compensar económicamente a las gentes de aquellos lugares para que mantengan intactos los ecosistemas. Estos convenios no difieren, desde los puntos de vista legal y económico, de los contratos de explotación maderera o de cualquier otro acuerdo comercial que otorgue a un determinado grupo el control y beneficio de recursos naturales. Los ingresos que los países en desarrollo podrían generar de este modo son equivalentes, y con frecuencia más estables, que los que obtienen en los volátiles mercados internacionales de la madera o de otros bienes agrícolas.

Sin otras opciones

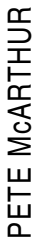
Una de las mayores ventajas de las concesiones de conservación es su refutación de que el rendimiento económico de los ecosistemas vaya unido a la destrucción de los hábitats naturales. Durante un estudio de la economía del cacao en Ghana, en la primavera de 2000, un funcionario de allí le explicó a Eduard Niesten, uno de los investigadores que trabajan con nosotros, que no se puede esperar que el gobierno de Ghana reserve más de ese 20 por ciento de su valiosa zona forestal de dosel alto que ya se encuentra protegida por la legislación de la nación. El resto ha de utilizarse para el desarrollo económico, aseveró. Tal convicción fatalista está muy extendida entre los gobiernos y los habitantes de muchos países en desarrollo, donde la planificación económica suele incluir un rápido crecimiento de la producción agrícola, especialmente después de que las talas hayan dejado limpia la tierra. Estas actividades representan una opción de desarrollo atractiva —tal vez la única— en los países tropicales, que suelen disponer en abundancia de tierra y de mano de obra no cualificada, pero carecen, en cambio, de capital suficiente para financiar iniciativas más costosas, como la industrialización.

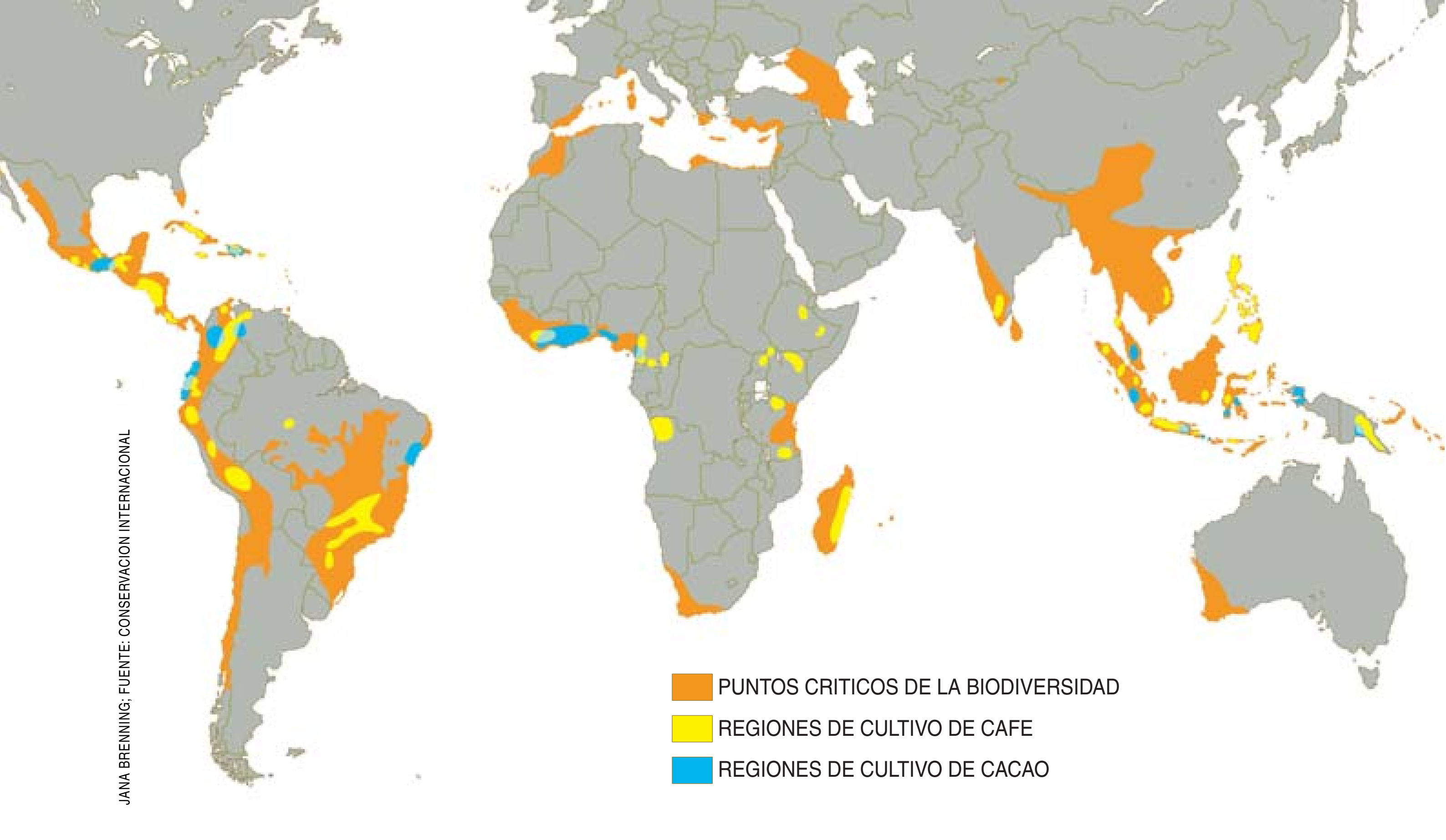
Para examinar la cuestión más de cerca, hemos constituido un equipo de investigación con otros seis miembros del Centro de Ciencias Aplicadas de la Biodiversidad, dependiente de Conservación Internacional, institución con sede en Washington D.C. Nos proponíamos estudiar los bienes agrícolas que se producen en las regiones más ricas y amenazadas, según los ecólogos, por lo que se refiere a su biodiversidad. Estos “puntos críticos” de la biodiversidad, 25 en total, que tan sólo cubren el 1,4 por ciento de las tierras

emergidas, han perdido alrededor del 70 por ciento de su vegetación primaria. Constituyen también los hábitats principales del 44 por ciento de las especies vegetales vasculares y del 35 por ciento de las de vertebrados terrestres. Nuestro equipo, basándose en este estudio, que nos llevó tres años, ha determinado que la destrucción de los hábitats es rápida y extensa, no sólo por la explotación de la madera, sino también para dejar sitio a la producción de cinco bienes agropecuarios: carne de vacuno, haba de soja, aceite de palma, café y cacao.

En los años ochenta mereció amplia publicidad la expansión de los ranchos de ganado en América del Sur, que supuso el 44 por ciento de la deforestación del continente sudamericano en aquel decenio. En la actualidad, una de las grandes amenazas que sufre la biodiversidad tropical sudamericana es la creciente producción de haba de soja, destinada, en su mayor parte, a la alimentación de ganado. Su cultivo se ha incrementado desde los años setenta, tan sólo en Brasil, en 13 millones de hectáreas; es la expansión más rápida en los trópicos de cualquier producto agrario. Los subsidios gubernamentales han permitido que esta actividad invada zonas que jamás alcanzó la agricultura. En la vecina Bolivia, la superficie dedicada a este cultivo ha crecido, por término medio, casi un 35 por ciento anual desde mediados de los años sesenta; se está aproximando rápidamente al millón de hectáreas.

En otros lugares, los bosques naturales se están convirtiendo a ritmo alarmante en tierras de cultivo de los otros tres productos antes citados. Ubicuamente esparcidos por los puntos críticos de la biodiversidad





LA CONSERVACION Y LA AGRICULTURA se disputan con frecuencia unas mismas y valiosas extensiones de terreno. Las principales zonas de cultivo del café y el cacao coinciden con algunas de las áreas más ricas y amenazadas por lo que se refiere a la biodiversidad. Estos dos cultivos, por sí solos, han reemplazado o degradado casi 20 millones de hectáreas de hábitats naturales en los trópicos.

de todo el planeta se encuentran el café y el cacao, que ocupan 11 y 8 millones de hectáreas. Su cultivo ha reemplazado a no menos del 80 por ciento de los bosques primigenios de Costa de Marfil. Malasia encabeza la producción de aceite de palma; se cultivan allí 3 millones del total de 6 millones de hectáreas dedicadas a este producto en todo el mundo. Indonesia, país donde se le dedican 2,5 millones de hectáreas, se ha empeñado en superar a su vecina como primera productora mundial y plantar los 15 millones de hectáreas que el gobierno ha asignado ya a tal fin.

Sin duda, la intención de quienes convierten ecosistemas de gran diversidad biológica en tierras cultivables o en bosques maderables es mejorar la suerte económica que les ha tocado. La amarga ironía es que las expectativas no se cumplen. Ocurre con frecuencia que los países que, a falta de mejores opciones económicas, se inclinan por la explotación de su madera y por la agricultura, no son competitivos en los mercados mundiales. La naturaleza misma de los mercados de exportación de bienes hace que muchos productores no obtengan beneficios durante varios años seguidos a causa de un exceso crónico de oferta. Por ejemplo, la cosecha anual de cacao, sumada a los excedentes ya acumulados, superó el consumo entre un 30 y un 70 por ciento al año en el período de 1971 a 1999. Recientemente, los plantadores de Africa Occidental recurrieron a quemar sus cosechas, en desesperada protesta por la situación. Tenemos otro llamativo ejemplo en Bolivia, donde la imposición en 1996 de un nuevo gravamen, a razón de 1 dólar por hectárea, a los 22 millones de hectáreas de concesiones madereras tuvo por consecuencia que los madereros abandonasen la explotación de casi 17 millones de hectáreas. Es decir, los beneficios netos posibles correspondientes a la explotación de estos bosques eran tan escasos, que un costo adicional de 1 dólar por hectárea al año bastó para que la mayor parte de las empresas abandonaran esas inversiones.

Cualquiera que sea su rentabilidad económica, todas estas situaciones pueden acabar en una pérdida generalizada e irreversible de biodiversidad. La noción de “práctica forestal o agraria viable” nació de este dilema, a saber, de la necesidad de promover el desarrollo económico y de mitigar su probable curso de destrucción ecológica. Pero nuestros estudios recientes nos han convencido de que el esfuerzo por dar a los consumidores de productos ecológicos un acceso más amplio a los mercados agrícolas no necesariamente constituye una opción adecuada para el desarrollo económico o la conservación. La fracción del mercado agrícola mundial correspondiente a bienes “verdes” se limita en gran medida a aquellos consumidores europeos o norteamericanos que dispongan de los medios para adquirir tales productos y estén, además, interesados en hacerlo. Esta realidad anula toda posibilidad de impedir la deforestación relacionada con muchos productos agrícolas; por ejemplo, el haba de soja brasileña, destinada al

LOS LIMITES DEL CONSUMO ECOLOGICO



PETE McARTHUR

Una iniciativa tendente a frenar la destrucción de los bosques tropicales que ha contado con una amplia difusión consiste en promover prácticas respetuosas con el medio ambiente en las explotaciones agrícolas o forestales. Ahora bien, la demanda de café, madera u otros bienes "verdes" producidos según esas prácticas certificadas se encuentra casi exclusivamente en Europa y en Norteamérica, donde los consumidores están dispuestos a pagar precios más altos para conservar la biodiversidad. Aunque su papel es importante, un mercado tan restringido cuenta con serias limitaciones.

No es fácil ampliar los mercados de café y cacao, por lo inseguro de su rendimiento económico. Cultiven, o no, productos "verdes", los campesinos han de habérselas con la descoordinada naturaleza de la producción a escala mundial, que con frecuencia provoca crisis de superproducción. La producción de cacao, por ejemplo, aumentó mucho en los dos últimos decenios pese al declive de los precios. Para que el consumo de productos "verdes" funcione en semejante contexto, no sólo es necesario que sean ecológicamente válidos los métodos de cultivo y cosecha; hay que garantizar también su rentabilidad económica en un mercado mundial competitivo.

La estrechez del mercado de madera "verde" tiene una causa diferente. Existen organizaciones sin ánimo de lucro, como el Consejo de Gestión de las Selvas, radicado en México, que han concedido certificados ecológicos a la actividad forestal de más de 5 millones de hectáreas en Asia, Africa y América del Sur. El problema radica en que casi toda la madera certificada producida en estos bosques es vendida en Europa o en los EE.UU., lo que supone, en conjunto, menos del 6,5 por ciento de los 228 millones de metros cúbicos de madera —ecológica, o no— que se producen en los trópicos cada año. Puestas aparte esas dos regiones, las demás están servidas, casi en su integridad, por explotaciones madereras no certificadas.

El supuesto más desfavorable se da en los puntos críticos de la biodiversidad –es el caso de Madagascar— donde la mayor parte de la madera extraída se convierte en carbón vegetal, que sirve de combustible a la población. Esta isla, cuya superficie no llega al 2 por ciento del área del vecino continente africano, alberga una asombrosa variedad de seres que no encontramos en ningún otro lugar del planeta, entre ellos no menos de 8000 especies de fanerógamas. Madagascar cobija también el 12 por ciento de las especies de primates, el 36 por ciento de las familias de primates y 33 especies de lemúridos que apenas si existen en otro lugar. Por todo ello, seguramente sea Madagascar la región de mayor importancia para la conservación de estos animales. Pero como los árboles se utilizan para consumo interno, los ricos extranjeros dispuestos a "comprar verde" no tienen posibilidad de influir en la deforestación de estos hábitats boscosos de valor incalculable.

UN NUEVO MERCADO "VERDE"



PETE McARTHUR

Las tierras reservadas para la conservación ecológica suelen ser vistas como el despilfarro de un recurso económico. La creación de un nuevo mercado, los servicios "verdes", promete eliminar este escollo. La voluntad internacional de subsidiar la conservación refleja la demanda, cada vez mayor, de protección para la biodiversidad del mundo, que a muchos países en vías de desarrollo no les sería difícil ofertar. No cuesta comprender este nuevo mercado: los propietarios de la tierra les arriendan recursos naturales a las organizaciones conservacionistas, las cuales les abonan tanto o más que las compañías madereras u otros arrendatarios destructivos. Estas "concesiones de conservación" no sólo protegen las tierras; también financian los servicios de conservación y generan empleo para la población local. Una concesión de conservación debidamente ejecutada

FACULTA A LOS PAISES ANFITRIONES PARA CONVERTIR EN CAPITAL SUS ABUNDANTES EXISTENCIAS DE HABITATS RICOS EN BIODIVERSIDAD. Con el sistema de concesiones los países tropicales no dependen tanto de los volátiles mercados de madera y de bienes agrícolas, y se benefician económicamente de la protección de sus recursos naturales. Tal beneficio puede conseguirse sin depreciar el valor del recurso natural y sin perjudicar los hábitats de la vida salvaje u otros aspectos del medio.

ESTIMULA EL DESARROLLO ECONOMICO AL REPRODUCIR LA ESTRUCTURA DE PAGOS DE OTRAS TRANSACCIONES COMERCIALES. Los arrendamientos cubren los impuestos y tasas estatales, las pérdidas de puestos de trabajo y la inversión en capital. Los pagos se realizan en divisa fuerte. Una parte de estas cuotas va a parar a las poblaciones locales, a la creación de empleo y a la inversión en programas sociales.

OFRECE UNA PROTECCION INMEDIATA Y TRANSPARENTE DEL TERRITORIO EN CUESTION. La naturaleza tangible de las concesiones de conservación permite cuantificar con claridad el rendimiento de las inversiones en biodiversidad. Deberían asimismo resultar atractivas a las grandes empresas que buscan formas de contrarrestar el impacto ambiental de sus actividades con beneficios inequívocos.

CATALIZA LA CONSERVACION EN SITUACIONES EN LAS QUE LA CREACION DE UN PARQUE NATURAL PUEDE NO RESULTAR FACTIBLE. Las concesiones de conservación proporcionan a los gobiernos una razón económicamente sólida para crear áreas que se extiendan más allá del sistema de parques. Las cantidades abonadas por el arrendamiento garantizan también una gestión a largo plazo de tales áreas, al contrario de lo que sucede con muchos parques nacionales, a los que no llegan los fondos suficientes.

REDUCE EL RIEGO DE FRACASO AL ESTABLECER INCENTIVOS ECONOMICOS CONTINUADOS PARA LA COOPERACION. En muchos países en desarrollo las inversiones empresariales comportan riesgos económicos sustanciales, pero un sistema bien construido de incentivos, basado en pagos anuales a cambio de la vigilancia de los recursos y de otros servicios de conservación, debería reducir mucho la tentación de romper los acuerdos de concesión.

forraje de ganado, el aceite de palma en Indonesia, que se cultiva para el consumo interno, o los árboles de Madagascar, utilizados como combustible por los lugareños (*véase el recuadro* "Los límites del consumo ecológico").

Incluso cuando los productos certificados —sean café, madera o carne de vacuno— llegan a los consumidores pudientes, el efecto conseguido no es tan importante como se pudiera pensar. Menos del 1 por ciento del café que se importa en los EE.UU. tiene el certificado de sus méritos sociales o ecológicos. Más aún, la mayor parte de las nuevas tierras dedicadas al cafeto se cultivan con la variedad "robusta", que se vende en general en los países subdesarrollados como café instantáneo, en lugar de con la variedad "arábiga", la más común en las cafeterías del mundo industrializado. No le va mucho mejor a la madera ecológica. Aun cuando cada metro de tabla importado de los países tropicales por Europa o los EE.UU. estuviera certificado, no se abarcaría más que el 6,5 por ciento de la producción total de los trópicos. El resto se vende en regiones donde los consumidores tienen poco o ningún interés por la madera certificada. De igual manera, la carne de vacuno producida orgánicamente está adquiriendo creciente popularidad en los países industrializados. Pero el comercio internacional de vacuno supone sólo entre el 1 y el 3 por ciento de la producción mundial; en las regiones subdesarrolladas, la producción de vacuno está creciendo por encima del 3 por ciento anual para atender el mercado interno.

Comercialización de servicios verdes

Cuanto más estudiábamos el efecto conservacionista de los mercados de la madera y de productos agrícolas, tanto más nos convencíamos de que el intento de apuntalarlo mediante precios más altos para los productos verdes no es la única forma de incentivar la conservación. La situación parecía especialmente trágica habida cuenta de la elevada demanda de protección de la biodiversidad que existe en la comunidad internacional. Está muy difundida la idea —errónea— de que la conservación no puede competir directamente con la mayoría de los demás usos económicos de los recursos naturales; en realidad, la importancia económica de la conservación es grande: la comunidad internacional, incluidos gobiernos, bancos de desarrollo multilateral y grupos ecologistas, dedica al menos 600 millones de euros al año al mantenimiento de la biodiversidad en los trópicos.

Esta suma representa tan sólo una pequeña parte de los fondos mundiales que, de existir mejores mecanismos de inversión, podrían ir a parar a los países ricos en biodiversidad. En 1999, un ejemplo tomado de Bolivia nos hizo ver hasta dónde pueden llegar esos recursos financieros. Ese año, Conservación Internacional le abonó 100.000 dólares a una compañía maderera para que renunciase a la explotación de 45.000 hectáreas de bosque. Como parte del acuerdo, el gobierno boliviano integró la zona en el contiguo parque nacional de Madidi. Saldo: una superficie mayor que la de Barcelona o Madrid recibió protección permanente por menos de lo que cuesta, en promedio, una vivienda en esas ciudades.

Trabajar con las concesiones madereras o con otros acuerdos de arrendamiento permite a las organizaciones conservacionistas obviar los problemas que entraña la adquisición directa de la tierra. A algunos gobiernos les solivianta la idea de que unos inversores extranjeros puedan hacerse con el control permanente de parte de sus territorios, sobre todo si están tratando de asegurarse una fuente regular de ingresos con sus recursos naturales. Por la misma razón, la incorporación de tierras a los parques nacionales —como lograron los conservacionistas que decretase el gobierno boliviano— es también una rara oportunidad. De ahí que la experiencia de Bolivia y otras similares nos inspirasen la idea de aprovechar los bajos precios por los que podrían arrendarse millones de hectáreas de selva en los trópicos.

Desarrollamos el método del arrendamiento de concesiones de conservación teniendo presentes varios objetivos principales (*véase el recuadro* "Un nuevo mercado verde"). Lo más importante era, tal vez, que las poblaciones locales recibieran una parte de los pagos efectuados por la concesión, en favor del empleo y los servicios sociales. Al igual que una compañía maderera abonaría salarios y proporcionaría ciertos beneficios a los lugareños por trabajar en sus serrerías, quien invierte en la concesión de conservación los contrataría para conservar el bosque.

Una vez que hubimos desarrollado un conjunto de criterios claros para este mercado de servicios verdes de nuevo cuño, nos dispusimos a crear, con carácter experimental, una serie de concesiones de conservación. Entre los primeros países que visitamos, en los inicios del año 2000, se contaba Perú. Teníamos el proyecto de pujar por una parte de las 800.000 hectáreas de bosque amazónico cuyo arrendamiento estaba el gobierno peruano sacando a subasta internacional. Durante nuestras negociaciones vimos confirmada la teoría de que el valor económico

Los autores

JARED HARDNER y RICHARD RICE han colaborado en estudios económicos de la conservación de la biodiversidad en América del Sur, en Africa y en Asia a lo largo de los 10 últimos años. Hardner obtuvo una maestría en economía de los recursos naturales en la Universidad Yale en 1996; cuatro años más tarde fue cofundador de Hardner & Gullison Associates, una consultora ambiental con sede en Palo Alto, en California. Rice posee una maestría en ciencias económicas y un doctorado en recursos naturales por la Universidad de Michigan (1983). En 1992 ingresó en Conservación Internacional (CI) y en 1999 aceptó su cargo actual de economista jefe del Centro de Ciencias Aplicadas de la Biodiversidad, en Washington, donde Hardner participa también como investigador. Los autores desean expresar su agradecimiento a los colaboradores Anita Akella, Gregory Dicum, Philip Fearnside, Sharon Flynn, Ted Gullison, Chris LaFranchi, Michelle Manion, Shelley Ratay, el personal de las oficinas de CI en Guayana y Perú y el de ProPetén en Guatemala.

ASOCIACION CON LOS PARQUES



PETE McARTHUR

Los parques nacionales constituyen una importante componente del plan de conservación de cualquier país. En naciones como Guatemala o Indonesia, las concesiones de conservación pueden ampliar la protección ofrecida por los parques, especialmente en áreas donde se permiten actividades económicas como la explotación maderera.

GUATEMALA

CONTEXTO DE LA CONSERVACION: En 1990, el gobierno de Guatemala creó la Reserva de la Biosfera Maya, con una extensión de 2 millones de hectáreas. La reserva incluye una región de usos varios, donde se permite la explotación comercial de recursos forestales, pero en sus zonas nucleares está vedada toda actividad, salvo las que se consideran benignas para el entorno, como la investigación científica o el ecoturismo.

LO QUE ESTA EN JUEGO: La Reserva Maya es la mayor de las selvas tropicales subsistentes en Guatemala y una de las partes principales de un pasillo biológico mesoamericano que alberga al jaguar y a otras especies que requieren grandes territorios.

LA AMENAZA: La explotación comercial de la madera (de la caoba en especial) y la invasión agrícola constituyen una amenaza para los bosques de la zona de usos varios.

CONCESION PROPUESTA: Conservación Internacional y su socio guatemalteco ProPetén confían en poder formalizar y cerrar dentro de este mismo año contratos de concesión de conservación con las poblaciones que gestionan unas 75.000 hectáreas de bosque en el interior de la zona de usos varios. Estas áreas de conservación adicionales empezarán a proporcionar hábitats de enlace entre dos zonas nucleares de la reserva, los parques nacionales de Tikal y de El Mirador.

INDONESIA

CONTEXTO DE LA CONSERVACION: El Parque Nacional de Siberut protege justo algo menos de la mitad de las 400.000 hectáreas de la isla de Siberut, en la costa occidental de Sumatra. En las 205.000 de fuera del parque sólo subsiste alrededor del 60 por ciento de la selva natural.

LO QUE ESTA EN JUEGO: Tres tipos bien diferenciados de hábitat natural, que abarcan pluviselvas tropicales de tierras bajas y ciénagas de agua dulce, dan sostén a diversas formas de vida. En la isla moran cuatro especies de primates —el gibón de Kloss, el langur de cola de cerdo, el langur de las Mentawai y el macaco de las Mentawai— que no existen en ningún otro lugar del mundo. Unos 35.000 mentawais, con una estructura social neolítica, dependen de los recursos forestales de la isla para subsistir.

LA AMENAZA: Están pendientes de aprobación propuestas de explotación comercial de la madera y de plantaciones de palma que afectan al 80 por ciento de la isla, e incluso a la zona de parque.

PROPUESTA DE CONCESION: Las autoridades de Siberut y Conservación Internacional están negociando una concesión de conservación que podría ampliar el área protegida por el parque y poner coto a la invasión de las explotaciones madereras o agrícolas.

de los recursos forestales del Perú —y de otras muchas regiones del mundo— es, en el mejor de los casos, muy reducido. El precio de salida de la subasta se hallaba entre 1 y 4 dólares por hectárea y año, y en ella iban a participar, además de nosotros, compañías madereras europeas y americanas, del norte y del sur. Sin embargo, en cosa de meses la subasta fue declarada desierta, porque los otros posibles pujadores habían dejado de interesarse en esas concesiones, presumiblemente por ser el precio de salida demasiado elevado. Aunque la suerte de este bosque concreto está por determinar, habíamos plantado una semilla que prendió en el terreno fértil preparado por los ecologistas peruanos.

Perú estaba dando los últimos retoques a su ley de bosques y espacios naturales, proceso en el cual diversos grupos conservacionistas buscaban soluciones que no consistieran en concesiones para la explotación de sus bosques. En abril de 2001, el gobierno decidió incluir las concesiones de conservación entre los usos legales de sus 67 millones de hectáreas de bosque de titularidad pública. Habíamos entrado en el mundo de las pujas sin saber de cierto si nos iba a ser permitido competir, así que éstas sí eran buenas noticias. Más o menos por esas fechas, un grupo ecologista peruano, la Asociación de Conservación del Amazonas, se puso en contacto con nosotros. Querían una concesión de conservación para dejar a salvo un hábitat natural de fundamental importancia donde pretendían instalar una estación de investigación ecológica. Según la nueva ley peruana, las concesiones podían adquirirse solicitando áreas concretas de especial interés para el licitador. No dejamos escapar esta oportunidad de contribuir a que se otorgase la primera concesión de conservación peruana.

Merced al trabajo científico y comunitario de la Asociación de Conservación del Amazonas, al asesoramiento jurídico de la Sociedad Peruana de Derecho Ambiental de Perú, a la ayuda de Enrique Toledo, consultor ambiental independiente, y al apoyo entusiasta del ministro peruano de agricultura, Carlos Amat y León, Perú estableció la concesión de conservación "Los Amigos" en julio de 2001. El acuerdo se centraba en un arrendamiento por 40 años renovables para la gestión de la conservación y el estudio de 130.000 hectáreas de bosque tropical. Este territorio forma parte de un pasillo ecológico que conecta los parques nacionales peruanos de Manu y Bahuaja-Sonene y protege a muchas de las 25.000 especies vegetales y 1700 de aves del país.

Tomando cuerpo

En el curso de nuestras negociaciones referentes a Los Amigos, mantuvimos también conversaciones sobre proyectos experimentales en Guayana y en Guatemala. En septiembre de 2000, el gobierno de Guayana otorgó a Conservación Internacional un permiso provisional por el que le concedía la conservación de unas 80.000 hectáreas en una región meridional del país. Durante los meses siguientes estuvimos trabajando con una comisión de funcionarios forestales a fin de negociar las cláusulas de un contrato por 25 años renovables. Esperamos lograr la conclusión del acuerdo correspondiente a esta porción deshabitada de selva dentro del año en curso.

En Guatemala, el gobierno ha concedido ya a aldeas licencias de explotación maderera, con una extensión de 2 millones de hectáreas, del interior de la Reserva de la Biosfera Maya. Estas gentes, que habitan el interior de la zona de la reserva destinada a usos diversos, en la cual están permitidas la tala y ciertas actividades económicas, producen en la actualidad madera ecológica certificada. Dos aldeas, empero, han propuesto abandonar la explotación maderera y optar por arrendar a los conservacionistas los árboles en pie y la obligación de proteger el ecosistema donde se encuentran. Estas poblaciones, que suman en total unos 110 hogares, podrían aplicar los ingresos procedentes de la concesión propuesta en salarios para los gestores de la conservación, en invertir en proyectos turísticos —guiar a los turistas, por ejemplo, hasta los yacimientos arqueológicos cercanos— y en proporcionar servicios sociales comunales, como la sanidad y la educación. Las concesiones propuestas, que preservarían tanto los bosques primigenios como unos importantes yacimientos de ruinas mayas, cubren aproximadamente 75.000 hectáreas aledañas a un parque nacional (*véase el recuadro* "Asociación con los parques"). Los acuerdos de Guatemala y de Guayana, desarrollados y financiados ambos por el Centro de Ciencias Aplicadas de la Biodiversidad de Conservación Internacional y por el Fondo Mundial para la Conservación, constituyen dos maneras muy diferentes de enfocar las concesiones.

Pese al escepticismo de unos y otros la idea está tomando cuerpo. El año pasado recibimos una llamada telefónica de un ecuatoriano que había viajado seis horas para llegar a la línea telefónica internacional más cercana; quería averiguar de qué forma se podría implantar una concesión de conservación en su aldea forestal costera. En los antípodas, hemos establecido una asociación con una pequeña organización no gubernamental de Indonesia, ansiosa por experimentar la idea en la protección de los frágiles ecosistemas marinos de ese país.

Ahora, junto con otros colegas, estamos examinando la posibilidad de obtener concesiones de conservación en Africa, Asia y América del Sur. Pronosticamos que las habrá en muchas otras zonas. Si estamos en lo cierto, las concesiones de conservación fundarán un mercado mundial de servicios verdes.

Bibliografía complementaria

LA CONTROVERTIDA GESTIÓN DE LA PLUVISELVA TROPICAL. Richard E. Rice, Raymond E. Gullison y John W. Reid en *Investigación y Ciencia*, págs. 4-10, junio de 1997.

BIODIVERSITY HOTSPOTS FOR CONSERVATION PRIORITIES. Norman Myers, Russell A. Mittermeier, Cristina G. Mittermeier, Gustavo A. B. da Fonseca y Jennifer Kent, en *Nature*, vol. 403, págs. 853-858; 24 de febrero de 2000.

EFFECTIVENESS OF PARKS IN PROTECTING TROPICAL BIODIVERSITY. Aaron G. Bruner, Raymond E. Gullison, Raymond E. Rice y Gustavo A. B. da Fonseca, en *Science*, vol. 291, págs. 125-128; 5 de enero de 2001.

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Un salto lleno de gravedad

Desde que se lanza hasta que se detiene, el saltador de esquís saca partido unas veces de la gravedad y otras de la fuerza centrífuga o del rozamiento del aire

Un saltador de esquís debe ante todo componérselas con la gravedad. Lo arrastra desde que se lanza por el trampolín, inclinado entre 35 y 38 grados respecto a la horizontal: al final de los 50 metros de trampolín habrá descendido unos 30 metros. Durante ese recorrido gana velocidad; su energía potencial, el producto de su masa por la elevación y por la aceleración impartida por la gravedad (9,8 m/s^2), se va transformando en energía cinética, proporcional al producto de la masa por el cuadrado de su velocidad.

Si no hubiese rozamiento, la energía potencial del esquiador se convertiría totalmente en energía cinética. Saldría del trampolín —cualquiera que hubiese sido su trayectoria— con una velocidad igual a la raíz cuadrada del doble del producto de la aceleración de la gravedad por la distancia descendida; es la misma que alcanzaría un esquiador que cayera en el vacío desde la misma altura. Cuando se desprecia el rozamiento, la velocidad de salida del esquiador no depende ni de su masa, ni de la pendiente del trampolín, sino sólo de la altura desde donde baja. Para ser un buen saltador no sirve de nada pesar mucho. Uno de los mejores saltadores actuales, el polaco Adam Malys, pesa 61 kilogramos para una talla de 1,65 metros.

Existen varios tipos de trampolines. En los “K90” el desnivel es de cerca de 40 metros; en los “K120”, de 50. En este último caso, el esquiador alcanzaría sin rozamiento una velocidad de despegue de 31,5 metros por segundo (113 kilómetros por hora). La fricción de los esquís en la nieve es despreciable, un buen revestimiento de la superficie de deslizamiento lo reduce al mínimo, pero en cambio la resistencia del aire frena al esquiador porque crece con el cuadrado de la velocidad.

Esa fuerza es también proporcional a la superficie proyectada sobre el plano perpendicular a la velocidad del cuerpo que penetra en el aire. Para deslizarse lo más rápido posible, al esquiador le interesa ofrecer al aire la menor superficie. Por eso adopta la “postura del huevo”: los brazos hacia atrás, pegados al cuerpo, y las piernas dobladas a la mitad.

La resistencia aerodinámica

Dado que la resistencia del aire crece con la velocidad, acaba por compensar la componente del peso paralela a la pista (la perpendicular se compensa con la reacción de ésta). El esquiador no se acelera más, se mueve por la pista a velocidad constante. Esa velocidad límite es del orden de 60 metros por segundo (213 kilómetros por hora), comparable a la de los paracaidistas en caída libre. Un trampolín de salto de esquí es demasiado corto para que los saltadores la alcancen. El rozamiento aerodinámico no es despreciable. En vez de los 31 metros por segundo previstos en ausencia de resistencia, la velocidad medida a la salida del trampolín es de sólo 25 metros por segundo (90 kilómetros por hora) en el trampolín de 50 metros.

El salto de trampolín empieza con una fase de impulso durante la cual se reduce la resistencia del aire con la “postura del huevo”. Aplastado por la fuerza centrífuga en la porción curva del trampolín, el saltador contrae los músculos. En el segmento recto final, sólo tiene un cuarto de segundo para enderezarse y proyectarse hacia arriba. En el vuelo, su postura optimiza la sustentación y rebaja la resistencia del aire.

DIBUJOS DE BRUNO VACARO

Durante la fase de impulso, el esquiador está lejos de permanecer inmóvil en una postura aerodinámica. Sus piernas trabajan intensamente a fin de preparar el salto y el vuelo subsiguiente. Mientras la pendiente de la pista no varía, las piernas sólo tienen que soportar la componente del peso perpendicular a la pista, unas 0,8 veces el peso del deportista. Al llegar al extremo, la pista se curva y vuelve casi horizontal. Mientras recorre la fracción curva, el esquiador sufre la fuerza centrífuga. Es la que, en las montañas rusas, oprime a los pasajeros contra el fondo de los asientos. Al saltador tiende a aplastarlo contra la pista, con una intensidad igual al producto de la masa por el cuadrado de la velocidad dividido por el radio de curvatura. Como éste es del orden de 90 metros, con una velocidad de entrada en la porción curva de 22 metros por segundo el esquiador soportará una fuerza suplementaria igual a un poco más que la mitad de su peso.

El saltador llega al final del arco de curva a 25 metros por segundo y entra en la zona de despegue. Es recta, de unos siete metros de longitud, y apunta levemente hacia abajo, con un ángulo de 7 a 12 grados respecto a la horizontal. La recorre en sólo un cuarto de segundo. En tan breve lapso, el esquiador, que ya no está aplastado por la fuerza centrífuga, se endereza haciendo fuerza sobre sus piernas; al elevar el centro de gravedad transforma la energía mecánica almacenada en sus músculos en energía potencial y sobre todo en energía cinética. Al final de la impulsión, la fuerza ejercida por las piernas del esquiador supera en 1000 newton (102 kilogramos) su propio peso. Es como si su cuerpo elástico rebotase en el arco de pista. La distensión del saltador aumenta su velocidad vertical en cerca de 2,5 metros por segundo. Con una buena sincronización, consigue al salir del trampolín una velocidad óptima: casi horizontal, incluso un poco apuntada hacia arriba. La longitud del salto depende entonces principalmente de la dirección de la velocidad y de la postura al inicio del vuelo.



FFS

Vuelo y sustentación

Durante el planeo, el saltador adopta la postura que le permite volar lo más lejos posible. En el aire, saca partido de fuerzas que en el trampolín no hacían más que frenarlo. Le interesa minimizar la resistencia del aire (disminuir la superficie "proyectada" hacia adelante), que tiende a rebajar su velocidad de vuelo, y aumentar la sustentación (aumentar la superficie proyectada hacia abajo), la fuerza que explica por qué los aviones se mantienen en el aire. Por ello, casi se acuesta sobre los esquís con los brazos pegados al cuerpo, a la vez que mantiene un ángulo constante de 20 grados entre los esquís y la velocidad. Esta postura viene dictada por la experiencia, pero las simulaciones por ordenador y los ensayos en túnel aerodinámico confirman su eficacia.

Asombra más que el esquiador mejore la sustentación disponiendo los esquís en V. Esta postura, inventada a fines de los años ochenta por el sueco Jan Bokloev, les pareció en un principio chocante a los puristas, habituados a los esquís paralelos. La mejora de los resultados fue tan evidente que, desde 1992, la alta competición sólo conoce especialistas en la postura de Bokloev. Cuando un esquiador logra la postura óptima, la sustentación llega a los 300 newton (30 kilogramos) durante el vuelo. ¡Y se duda de que un efecto de tal amplitud influya en las marcas!

Sin embargo, para que la competición mantenga su interés, es esencial que la fuerza de sustentación proceda de las aptitudes del esquiador y no de la forma o de la naturaleza de su equipo. Por ello, las normas internacionales del salto con esquís limitan estrictamente las medidas, los materiales y la confección de los trajes de los esquiadores. Para evitar que el saltador se transforme en un ala volante, su indumentaria debe ceñirse al cuerpo; no debe superar en más de ocho centímetros el perímetro de tórax. El tejido no puede favorecer la sustentación. No debe estar ni plastificado ni revestido de caucho; ha de dejar que penetre el aire.

El aterrizaje

Tras permanecer en vuelo durante cinco eternos segundos, el esquiador ha recorrido más de 100 metros (hasta 130). Se prepara entonces para aterrizar, unos 40 metros por debajo de donde despegó. Pese a tan impresionante desnivel, durante su vuelo no ha estado en ningún momento a más de cinco o seis metros sobre la pista, ya que el perfil de ésta sigue aproximadamente su trayectoria. Mejor aún: el perfil está estudiado para que en la zona de aterrizaje la pista sea recta y casi tangente a la trayectoria del saltador. Así se toma tierra con facilidad; la velocidad del saltador es grande, pero sus piernas sólo tendrán que soportar el equivalente a un salto de unas decenas de centímetros. Tras la zona de toma de tierra, la pista se encorva de nuevo y retorna paulatinamente a la horizontal a fin de que los esquiadores, entorpecidos por los largos esquís, se detengan sin dificultad.

JUEGOS MATEMÁTICOS

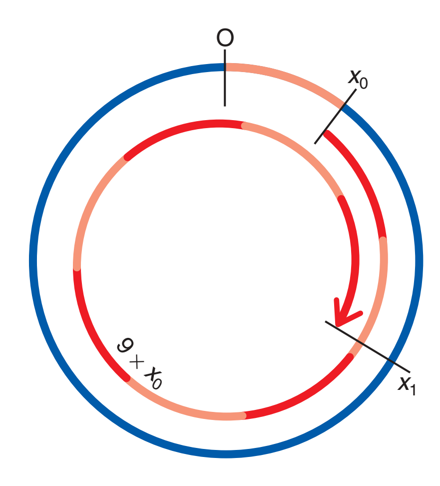
Juan M. R. Parrondo

Caos, determinismo y voluntad

En el problema azar-determinismo parece no haber espacio alguno para eso que llamamos "voluntad". Un suceso, o bien está determinado por el pasado o bien es aleatorio. ¿Cómo surge, entre estas dos posibilidades, la sensación que experimentamos ante un acto voluntario? Cuando decidimos continuar leyendo este artículo o dejar de hacerlo aquí, tenemos la íntima (y legítima) impresión de estar tomando una decisión: el acto no está determinado ni es aleatorio, sino que nace de nuestra propia voluntad. Nos sentimos "creadores" de esa decisión, capaces de cambiarla en el último segundo, lo cual parece incompatible con el determinismo; y somos conscientes en todo momento de ella, de modo que tampoco puede explicarse como un suceso completamente aleatorio. Experimentamos la voluntad como una especie de "generador" insertado en la cadena de la causalidad, cuya naturaleza escapa a la dicotomía azar/determinismo.

Para muchos científicos y pensadores, la teoría del caos determinista ha supuesto una "tercera vía", en la que la voluntad puede tener una mejor cabida. Sin abandonar el determinismo, nos muestra que puede haber una riqueza de comportamiento suficiente como para albergar la sensación subjetiva de voluntad.

Una de las ideas clave de la teoría del caos determinista es la llamada *sensibilidad a las condiciones iniciales*, conocida más popularmente como *efecto mariposa*. El nombre proviene de la imagen que utilizó el meteorólogo E. Lorenz para explicar el comportamiento caótico del clima: el batir de las alas de una mariposa en China puede provocar un huracán en el Caribe. El efecto se puede observar en un sistema determinista muy sencillo. Supongamos que un hombre camina a lo largo de una circunferencia que mide un kilómetro (*véase la figura 1*). Cada día camina, en el sentido de las agujas del reloj, nueve veces la distancia que le separa del punto O, tomada a lo largo de la circunferencia. El comportamiento del hombre está así completamente determinado por su posición inicial. Si x_0 es la distancia (en kilómetros) que le separa del punto O inicialmente, después de caminar durante el primer día se encontrará a una distancia:



Un recorrido circular que genera un comportamiento caótico

$$x_1 = \text{Parte decimal de } (10 \times x_0)$$

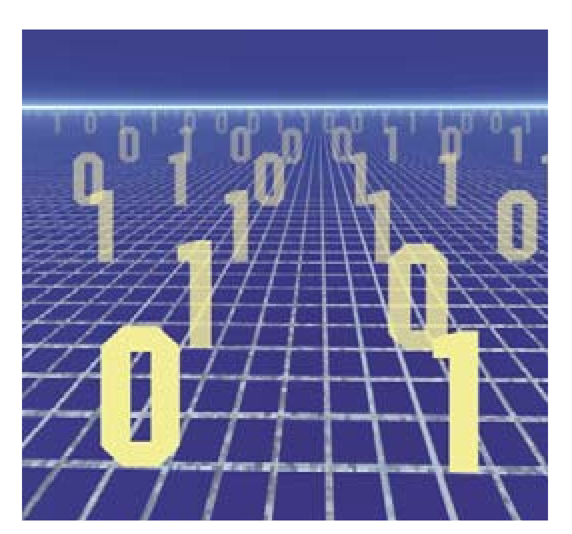
Veamos por qué. En el primer día, recorre $9x_0$. Como ya le separaba de O una distancia x_0, su posición con respecto a O sería $10x_0$ si anduviera en línea recta. Sin embargo, hay que tener en cuenta que se mueve sobre una circunferencia de un kilómetro, de modo que da una vuelta cada vez que recorre un kilómetro. Para cancelar el efecto de estas vueltas, se toma simplemente la parte decimal de $10x_0$.

En los días sucesivos, el comportamiento es el mismo, de modo que, si x_n es la distancia que separa al hombre de O en la noche del día n-ésimo, entonces:

$$x_{n+1} = \text{Parte decimal de } (10 \times x_n)$$

Esta ecuación es bastante más sencilla de lo que parece a simple vista. Recordemos que multiplicar por 10 un número no es más que correr su coma decimal un lugar hacia la derecha. Por otra parte, tomar la parte decimal de un número no es más que hacer cero su parte entera. Por lo tanto, para obtener la posición en el día $n + 1$ lo único que hay que hacer es eliminar la primera cifra decimal de la posición en el día n. Por ejemplo, si la posición inicial es 0,4539..., en la noche del primer día será 0,539..., en la del segundo día 0,39..., y en la del tercer día, 0,9... ¿Cuál es la posición en la noche del cuarto día? Para calcularla, necesitaríamos saber con más precisión la posición inicial de nuestro individuo. Como puede verse, a lo largo de los días, el desarrollo decimal de la posición inicial del individuo se va "desplegando", de modo que cada vez necesitamos conocer cifras más alejadas del desarrollo decimal de x_0. Para calcular la posición al cabo de trece días necesitaríamos conocer la posición inicial con una precisión cercana al tamaño de un átomo, que es del orden de 10^{-13} kilómetros. Esto es evidentemente absurdo: la misma noción de posición deja de tener sentido con una precisión tan grande, puesto que, aunque fijáramos un punto del individuo, su centro de masas, digamos, las fluctuaciones serían mayores que la precisión requerida. Sin embargo, lo interesante de nuestro ejemplo no estriba en si es posible o no realizarlo físicamente, sino en lo que puede ilustrar acerca de la nueva visión del determinismo que ofrece la teoría del caos.

La sensibilidad a las condiciones iniciales resulta evidente en nuestro sistema: si dos hombres parten de



El infinito puede desplegar todas las posibilidades

posiciones iniciales muy cercanas, que difieren en una cantidad desconocida pero del orden de la centésima de milímetro, al cabo de ocho días la situación de uno no tendrá nada que ver con la del otro. El sistema amplifica cualquier desviación inicial, por pequeña que sea, si se espera suficiente tiempo, al igual que la dinámica caótica de la atmósfera es capaz de amplificar perturbaciones minúsculas, como el batir de las alas de una mariposa.

¿Qué tiene que ver el efecto mariposa con la voluntad y el problema que exponíamos al comienzo del artículo? La respuesta es que un sistema caótico puede desplegar a lo largo del tiempo la información infinita contenida en su condición inicial. Para hacernos una idea de lo que esto supone, vamos a recurrir a lo que bien podría llamarse la *Biblioteca de Babel Multimedia*.

La Biblioteca de Babel es un relato de Borges que recoge una vieja idea: la posibilidad de que exista una biblioteca con todos los libros de, pongamos, 300 páginas que pudieran escribirse con las 28 letras del alfabeto más los espacios y signos de puntuación. El número de volúmenes sería inmenso aunque finito. La biblioteca tendría pasillos y estanterías de los cuales sólo podría recorrerse una ínfima parte a lo largo de toda una vida. Aunque la biblioteca contendría todos los libros escritos y por escribir, todos los tratados filosóficos y todas las posibles novelas, la mayoría de los volúmenes estarían repletos de páginas sin sentido. Borges dibuja la biblioteca como un recinto kafkiano, que contiene grandes revelaciones pero prácticamente inaccesibles. Explorar la biblioteca es como explorar un universo que, como el nuestro, contiene más enigmas que respuestas.

La Biblioteca de Babel Multimedia es una versión modernizada, que contiene todos los posibles DVD. Es de nuevo un número inmenso y finito. En ella están todos los libros, y todas las películas, todos los vídeos y todas las piezas musicales interpretadas de todas las formas posibles, lo que hace de ello algo un poco más perturbador que la biblioteca original de Borges. Se encuentra en ella el vídeo de su primera comunión, el vídeo en el que usted está leyendo este artículo y el vídeo en el que comenzó a leerlo pero lo abandonó en el primer párrafo.

Lo sorprendente es que un número escogido al azar entre 0 y 1 contiene en su desarrollo decimal toda la Biblioteca de Babel Multimedia. El matemático francés Émile Borel introdujo el concepto de *números normales*, números en cuyo desarrollo decimal están todas las posibles subcadenas de dígitos. En otras palabras, si tomamos un número normal, lo expresamos en binario y cortamos fragmentos equivalentes a la extensión de un DVD, obtendremos una réplica (de hecho obtendremos infinitas réplicas) de la Biblioteca de Babel Multimedia. Más aún, Borel demostró que la mayoría de los números entre 0 y 1 son números normales, de modo que un número escogido al azar será normal con probabilidad uno.

Volvamos a nuestro hombre que camina a lo largo de la circunferencia. Si su posición inicial es un número normal, las que irá ocupando al final de cada día desplegarán una información equivalente a la Biblioteca de Babel. Por supuesto, hay que esperar un número inmenso de días para obtener el primer DVD de la Biblioteca, pero lo importante es que toda esa información se halla contenida, *desde el principio*, en la posición inicial del individuo.

Si la mayoría de los sistemas físicos, químicos, biológicos y neuronales son caóticos, estarán a su vez desplegando en su evolución el contenido informativo de unas condiciones iniciales que pueden ser números normales; además, lo estarán haciendo de forma bastante más rápida que el individuo de nuestro ejemplo. Aunque no sepamos exactamente cuál es esa información y cuál es la dinámica que rige dicho despliegue, de lo que no hay duda es de que la imagen que teníamos del determinismo cambia por completo cuando se consideran estas posibilidades. Que lo que voy a hacer mañana esté descrito con todo detalle en algún volumen de la Biblioteca de Babel es una necesidad lógica, que no contradice el hecho de que yo efectivamente decida lo que voy a hacer. Las dinámicas caóticas, aun siendo deterministas, van desplegando la información infinita contenida en las condiciones iniciales, como el bibliotecario de Borges va extrayendo volúmenes de las estanterías. En esa exploración hay bastante más espacio para albergar la sensación subjetiva de voluntad.

No quiero decir con ello que la teoría del caos resuelva el problema. El problema de la voluntad, con el aún más fundamental de la conciencia, son probablemente los más difíciles a los que se enfrenta la ciencia. Estamos lejos de poder dar una explicación científica a la experiencia que uno tiene de sí mismo, de detallar los procesos y mecanismos que hacen que uno pueda tener conciencia de sí mismo, de ser y de decidir. E incluso puede que tal descripción no sea posible dentro de un marco puramente científico. Pero la teoría del caos sí nos está ofreciendo una idea del determinismo mucho más amplia, en la que las cadenas de causalidad contienen una riqueza inesperada y son capaces de desplegar en tiempo finito una inmensa cantidad de información, igual que el huracán del Caribe contiene, en la suma de causas que lo provocan, detalles ínfimos e imperceptibles como el lejano batir de las alas de una mariposa.

Mark Fischetti

Navegación en automóvil

Ya no es raro que el salpicadero de un coche lleve instalado un sistema de navegación que muestre mapas y dé instrucciones. Mientras conducimos, el controlador de derrota recibe información de los satélites del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), del cable del velocímetro y de su propio giróscopo. Con esos datos sitúa con precisión el vehículo. A continuación consulta los mapas almacenados en su memoria y nos ubica en una calle concreta. Actualizará segundo a segundo las coordenadas; sabrá de esa manera si hemos llegado a un cruce o girado erróneamente.

Cuando queremos instrucciones, marcamos con un mando a distancia unas señas o seleccionamos un lugar ya incluido en la memoria del dispositivo, un restaurante por ejemplo. Un programa heurístico estudia todos los trayectos posibles desde nuestra posición actual al destino y calcula la ruta más rápida basándose en informaciones relativas al tamaño de las calles, los límites de velocidad, etc. Y entonces viene lo más delicado. Una voz sintetizada nos dice cuál debe ser nuestra próxima acción; que tomemos la siguiente calle a la derecha, por ejemplo. Pero el navegador ha de anunciar la orden en el instante adecuado. No queremos que se nos diga una y otra vez durante un minuto que giremos a la derecha, pero tampoco que nos ordenen "¡ahora, a la derecha!" con sólo un segundo de antelación. Para determinar qué instrucciones debe darnos y cuándo, el programa casa el derrotero del coche con los datos cartográficos por medio de unos algoritmos.

Los cálculos son inútiles si los mapas no son exactos. Navigation Technologies, de Chicago, compila los mapas de todos los navegadores automovilísticos de EE.UU. y de la mayoría de los europeos. Para cada nuevo territorio recurre a un mapa oficial, pero manda además un ejército de analistas de campo a que recorra cada palmo de cada vía para corregirlo y añadir detalles. "El personal de campo es el verdadero corazón de nuestro sistema", dice Austin Klahn, vicepresidente de desarrollo técnico de NavTech. Un sistema de NavTech sigue a esos analistas mientras conducen; ellos, por su parte, introducen en un ordenador portátil conectado al sistema la información relativa a 150 elementos físicos: señales de stop, prohibiciones de giro en los cruces, entradas a los estacionamientos, las señas de cada manzana. Los ordenadores portátiles actualizan la base de datos central de NavTech, que se comprime en un CD-ROM o DVD. Los clientes cargan la última versión del disco en el equipo de su coche.

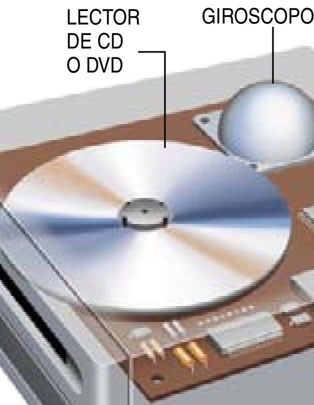
SATELITE GPS

LA PANTALLA DEL SALPICADERO muestra un mapa de calles de los alrededores de donde se halle el automóvil. Una voz sintetizada informa al conductor de cuál es la salida de autopista o bocacalle más oportuna para encaminarse al destino deseado.

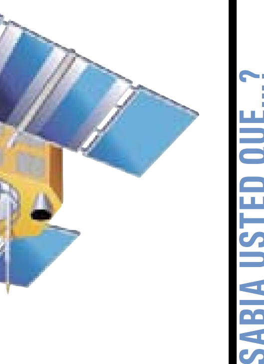




EL CONTROLADOR utiliza marcas horarias para calcular las distancias del vehículo a cada satélite y determina por triangulación su longitud y latitud. Combina esa información con la dirección del automóvil, detectada por un giróscopo y una brújula, y con su velocidad, tomada del cable del velocímetro. Seguidamente contrasta esa información con las coordenadas del mapa de calles guardado en la memoria para ubicar el vehículo en un punto concreto con una precisión de menos de cinco metros. El proceso se repite cada segundo para actualizar la posición y la velocidad del vehículo.



GEORGE RETSECK



¿SABIA USTED QUE...?

➤ **LA DIFUSION ES DESIGUAL.** En Japón, de un 15 a un 20 por ciento de los coches nuevos se encargan con sistema de navegación a bordo; en Europa el porcentaje es de un 5 a un 10 por ciento y en EE.UU. de un 2 por ciento. Los precios son inferiores en Japón y en Europa que en Estados Unidos.

➤ **LAS RUTAS NO SON PERFECTAS.** Navigation Technologies crea los mapas de los navegadores; otras firmas, Delphi por ejemplo, construyen los equipos que instalan los fabricantes de automóviles. Estos disponen de divisiones que se encargan de proveer el servicio. “Hay un algoritmo de encaminamiento óptimo”, dice Austin Klahn, “pero requiere muchísima computación”. Un sistema puede tardar 10 minutos en calcular la ruta óptima, demasiado cuando se va al volante. Y un cálculo de un segundo aconsejará quizás una ruta pésima. Cada proveedor de servicios idea sus propios algoritmos de modo que ofrezcan las mejores instrucciones en un tiempo prudente: por lo general, antes de 10 segundos.

➤ **NAVEGACION A PIE.** Si los fabricantes de asistentes digitales de bolsillo consiguen aumentar las memorias de sus productos hasta 500 megabytes o un gigabyte y añadirles dispositivos GPS, podrán ofrecer navegadores para caminantes. Vecinos y visitantes de una ciudad obtendrían indicaciones acerca de cómo ir a pie o en metro a restaurantes y oficinas. El instrumento podría reemplazar también la parte de los navegadores de automóvil instalada en el salpicadero. Bernoulli e IBM ya ofrecen microunidades de un gigabyte para los asistentes de bolsillo.

LA ANTENA recibe una marca horaria exacta de tres o cuatro satélites de los 24 que componen el GPS.

PANTALLA
ANTENA
CABLE AL VELOCIMETRO
MANDO A DISTANCIA
BRUJULA
CONTROLADOR
RECEPTOR GPS

LIBROS

Física del siglo XX

Algo más que una revolución

PHYSICS, THE HUMAN ADVENTURE. FROM COPERNICUS TO EINSTEIN AND BEYOND, por Gerald Holton y Stephen G. Brush. Rutgers University Press; New Brunswick, 2001. **GREAT PHYSICISTS. THE LIFE AND TIMES OF LEADING PHYSICISTS FROM GALILEO TO HAWKING**, por William H. Cropper. Oxford University Press; Nueva York, 2001. **CAMBRIDGE SCIENTIFIC MINDS**. Dirigido por Peter Harman y Simon Mitton. Cambridge University Press; Cambridge, 2002.

HENRY NORRIS RUSSELL: DEAN OF AMERICAN ASTRONOMERS, por David H. DeVorkin; Princeton University Press; Princeton, 2000. **WALTER BAADE. A LIFE IN ASTROPHYSICS**, por Donald E. Osterbrock. Princeton University Press; Princeton, 2001.

THE PHYSICS OF A LIFETIME. REFLECTIONS ON THE PROBLEMS AND PERSONALITIES OF 20TH CENTURY PHYSICS, por Vitaly L. Ginzburg. Springer Verlag; Berlín, 2001. **ATOM AND ARCHETYPE. THE PAULI/JUNG LETTERS 1932-1958**. Edición preparada por C. A. Meier; Princeton University Press; Princeton, 2001. **PHYSICS MEETS PHILOSOPHY AT THE PLANCK SCALE**. Dirigido por Craig Callender y Nick Huggett. Cambridge University Press; Cambridge, 2001.

Una cosa es predicar y otra dar trigo. Una cosa es proclamar la necesidad de incorporar la historia de la física en la explicación de la disciplina y otra, muy distinta, hacerlo. En la única ocasión en que se ha logrado (*Physics, the Human Adventure. From Copernicus to Einstein and Beyond*), Gerald Holton y Stephen G. Brush se sumergen en la naturaleza del descubrimiento, la creación del concepto, la construcción de la argumentación y la comprobación de la teoría. No puede apreciarse la cinemática galileana sin comprender la teoría aristotélica del movimiento, ni la relatividad de Einstein sin entender las tesis de Newton sobre el espacio y el tiempo. Una labor que se propone sin sacrificar las lúcidas explicaciones de los protagonistas, ni ahorrar en formalismo matemático, propio de la ciencia y, por tanto, de los manuales introductorios.

La física decantada en los libros de texto refleja, en buena medida, conocimientos sistematizados en el siglo XIX. A finales de esa centuria (*Great Physicists*), percibíase ya una unidad subyacente en los fenómenos. Si la mecánica de Galileo y Newton explicaba el movimiento de los cuerpos, de los proyectiles a los planetas, la teoría cinético-molecular había generalizado la mecánica al mundo submicroscópico del calor, entendido como movimiento de átomos, y del sonido, considerado una perturbación vibratoria, móvil, que se propagaba entre las moléculas. Cabía esperar que los fenómenos de la luz, la electricidad y el magnetismo hallaran también su justificación en la mecánica, ya fuera postulando partículas sometidas a leyes de fuerzas o apelando a ondas transmitidas por el éter.

Pero ese mar de tranquilidad se alteró el 8 de noviembre de 1895. En su laboratorio de la Universidad de Würzburg, Wilhelm Conrad Röntgen advirtió la fluorescencia experimentada por una pantalla de cianuro de platino y bario, situada a un metro de distancia de un tubo de Hittorf-Crookes, cuando lo atravesaba una corriente de alto voltaje. Publicó sus resultados "Sobre una nueva clase de rayos" en las memorias del centro; y el día de año nuevo de 1896 envió separatas con algunas de sus imágenes de los "rayos X", así los llamaba, a un número selecto de físicos europeos.

El texto llegó a Cambridge, donde Joseph John Thomson ocupaba desde 1884 la cátedra Cavendish (*Scientific Minds*). Lo mismo que sus predecesores Maxwell y Rayleigh, Thomson era un excelente matemático, si bien carecía de su habilidad experimental. Para su primera tarea en el laboratorio —conducción de la electricidad en los gases a baja presión— contó con la ayuda de Ebenezer Everett. Maxwelliano de formación, Thomson abordó con método propio el electromagnetismo y dio un notable paso adelante cuando mostró que una esfera móvil, portadora de una carga eléctrica, generaría un campo magnético en cuya virtud aumentaría su energía. Era como si parte de la masa de la esfera residiera en el éter circundante. Oliver Heaviside propuso que, cuanto más célere se moviera un cuerpo dotado de carga, más aumentaría su masa; no podría, pues, acelerarse más allá de la velocidad de la luz. Y cuando, años después del descubrimiento del electrón, se verificó experimentalmente la expresión de Heaviside, le pareció a Thomson que no había lugar para una masa intrínseca, aparte del componente electromagnético del éter. Expresó esta opinión en 1903, naturalmente sin saber que muy pronto la teoría de Einstein de la relatividad exigiría el mismo aumento de masa, cualquiera que fuera su origen.

Thomson se aprestó a investigar los rayos de Röntgen. Sabía que en una descarga de gas a baja presión se emitía una radiación procedente del electrodo negativo —los rayos catódicos— que provocaba la fluorescencia del tubo de vidrio. ¿Se trataba de ondas, según postulaban los físicos alemanes, o eran partículas? Como la luz, los rayos se propagaban en línea recta y arrojaban sombras; pero a diferencia de la luz, un campo magnético podía desviarlos. Thomson y Everett se las ingeniaron para obtener una presión muy baja, de suerte que cuando se aplicara un campo eléctrico no quedara neutralizado por las cargas del gas residual. Las mediciones de la desviación eléctrica de los rayos catódicos decantó la decisión en favor

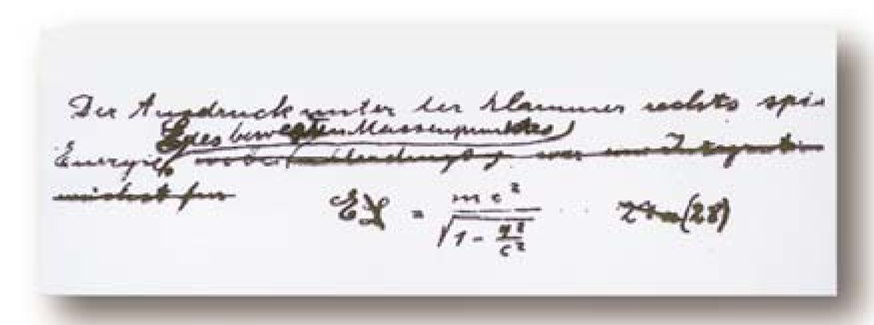
de las partículas, mil veces más ligeras que el átomo de hidrógeno. (El artículo clásico de 1897, “Cathode Rays”, se publicó en *Philosophical Magazine*.)

Thomson y sus discípulos midieron las propiedades del nuevo corpúsculo, un constituyente básico de todos los átomos. Se concentraron en la carga eléctrica, negativa, la misma quizá que la carga portada por un ion en una solución salina; esta carga había sido bautizada con anterioridad por Stoney con el nombre de electrón. El descubrimiento del electrón coronaba la obra de Michael Faraday, quien en 1821 construyó un motor en cuya virtud un campo magnético desviaba una corriente eléctrica y la confinaba en una trayectoria circular. Una vez que Thomson estuvo convencido de que todos los átomos contenían electrones negativos comenzó a idear modelos.

Para estudiar con Thomson arribó a Cambridge en 1895 Ernest Rutherford, procedente de su Nueva Zelanda natal. Le asignó emplear los rayos X para producir iones en los gases y estudiar su movilidad. Pero pronto se sintió atraído por la radiactividad, descubierta por Henri Becquerel en 1896. Antes de trasladarse a la Universidad MacGill (1898) había dividido las emisiones radiactivas entre rayos α y β. Con Frederick Soddy postuló que los átomos de los elementos más pesados (uranio, torio y radio) se desintegraban espontáneamente a través de la emisión de un rayo α de alta velocidad (partícula identificada más tarde con el núcleo del helio) o un rayo β a alta velocidad (electrón). La conclusión más notable de la investigación durante los años 1902-1903 de Rutherford y Soddy fue que la desintegración radiactiva implicaba una transmutación real de un elemento en otro.

La emisión de partículas α y β por los elementos radiactivos naturales sugería la posibilidad de construir un modelo del núcleo atómico con estos bloques. Pero el primer elemento, el hidrógeno, ofrecía dificultades, al poseer una sola carga positiva nuclear y aproximadamente un cuarto de la masa de una partícula α.

La nueva física incipiente pugnaba por encajar en las ecuaciones



Manuscrito de Einstein de 1912

clásicas. Con su hipótesis sobre los cuantos Planck se proponía sólo retocar la teoría electromagnética de Maxwell, no sustituirla. Doquiera fue necesario se recurrió a hipótesis *ad hoc*; así cuando del experimento de Michelson-Morley se desprendía que no podría observarse el movimiento de la Tierra a través del éter, G. F. FitzGerald y H. A. Lorentz adujeron que los cuerpos que se mueven a través del éter se contraerían tal vez, por lo que los aparatos de medición no detectarían movimiento alguno.

Hasta que Albert Einstein se decidió cortar con el pasado allí donde la teoría constituía un óbice, por ejemplo, prescindiendo del éter. Los teóricos del siglo XIX vieron en el marco newtoniano de un espacio y un tiempo absolutos un lugar conveniente para ubicar el éter, que propagaba la luz y otras ondas electromagnéticas. Pero por mucho que Albert Michelson y Edward Morley se esforzaron por detectar el movimiento de la Tierra en relación con “un mar de éter”, nunca lo lograron. Ignorando ese piélago, Einstein demostró que, para dos observadores que se movieran entre sí a velocidades constantes, las mediciones de longitud y tiempo eran distintas. Además de circunscribir su teoría “especial” de 1905 a los sistemas inerciales que se movían a velocidades relativas constantes, no incluía la teoría de la gravitación de Newton. Pero una teoría general de la relatividad debía reconocer los efectos gravitatorios y los sistemas no inerciales (los que se aceleran entre sí). El tiempo y el espacio se hallan imbricados en los sistemas de aceleración. Una teoría general de la relatividad tenía que basarse en una geometría no euclídea, la esbozada a mediados del siglo XIX por Bernhard Riemann. De repente el universo se hizo abordable, maleable, un objeto con una topología y una geometría dinámicas.

La mecánica cuántica, por su parte, halló un primer esfuerzo sistematizador en Niels Bohr y su modelo del átomo de hidrógeno (compuesto por un protón y un electrón), al tiempo que Rutherford seguía investigando en el núcleo. En 1920 Rutherford avanzaba ya el estrecho ligamen entre un protón y un electrón en un par neutro, sin dejar de buscar con ahínco pruebas de la transformación nuclear. Para ello contó con la ayuda de P. M. S. Blackett, quien en 1924 obtenía, en una cámara automática de niebla, ocho trazas (a partir de 23.000 fotografías) confirmantes de la transformación nuclear.

Un año después se establecen las bases teóricas de la nueva mecánica cuántica. Su súbito esplendor en Cambridge se deberá a Paul Adrien Maurice Dirac. Tras graduarse en ingeniería eléctrica por Bristol en 1921, dedicó dos años al estudio de la matemática hasta que obtuvo una beca para ahondar en física con Ralph Fowler. En ese tiempo Dirac tenía un conocimiento sólido del electromagnetismo y de la teoría de la relatividad, pero sabía muy poco de la nueva teoría cuántica del átomo, iniciada por Bohr un decenio antes. En parte orientado por Fowler y en parte avanzando por sus propias investigaciones, Dirac comprendió muy pronto la nueva disciplina. En menos de un año había publicado ya sus primeros artículos sobre teoría cuántica.

Aunque reconoce la potencia de la teoría sobre la estructura atómica propuesta en 1925 por Werner Heisenberg, elabora su propia for-

Técnica militar

GEMA: Birthplace of German Radar and Sonar, por Harry von Kroge. Traducción de Louis Brown. Institute of Physics Publishing; Bristol y Philadelphia, 2000.

Se narra en este interesante libro la historia de GEMA, siglas de Gesellschaft für Elektroakustische und Mechanische Apparate, la empresa que desde antes del comienzo de la II Guerra Mundial trabajó para la Armada alemana, prácticamente en exclusividad, en el desarrollo y fabricación de equipos de radar y sonar. Desde el campo aliado se consideraba que GEMA no era sino una tapadera para las actividades de la Armada alemana dentro de las investigaciones sobre la detección y localización de blancos no visibles y que, de hecho, era propiedad de ella. Pero, a diferencia de lo ocurrido en Gran Bretaña y Estados Unidos a lo largo y antes de la guerra, en Alemania tales investigaciones no se llevaron a cabo bajo el impulso gubernamental en laboratorios oficiales y con el concurso más o menos amplio de compañías privadas, sino que originalmente se debieron a la iniciativa de dos jóvenes ingenieros que, desde poco antes del final de la I Guerra Mundial, comenzaron a interesarse en la telegrafía y la telefonía sin hilos y compartieron ese y otros intereses desde que coincidieron, siendo aún estudiantes, en Postdam en 1917. Se trata de Paul-Gunther Erbslöh y de Hans-Karl Freiherr von Willisen, propietarios y fundadores de la GEMA en 1934 y cuyos nombres deben asociarse a los progresos registrados a lo largo del siglo XX en el campo de la electrónica. A ellos debe unirse el de Rudolf Kühnhold, físico, director de la NVA (Nachrichtenmittel-Versuchsanstalt, Centro de experimentación de comunicaciones), organismo encargado de la investigación y desarrollo de las comunicaciones navales, quien trabajó en estrecha colaboración con Erbslöh y von Willisen desde 1932, siguiendo la trayectoria que documentadamente se expone en el libro.

Desde el punto de vista de la investigación histórica, esta obra posee un mérito especial. Con la diáspora subsecuente a la derrota, la mayor parte de los archivos y documentación, así como gran parte de los equipos, de la GEMA se perdieron o se dispersaron, por lo que el autor tuvo que emplear décadas en localizar y entrevistar personas que ocuparon puestos de relevancia en la empresa, gracias a lo cual pudo hacerse con un material documental suficiente para reconstruir al detalle la historia de la GEMA, cuya parte más sustancial se expone en este libro.

Desde el punto de vista histórico propiamente dicho, la obra presenta dos vertientes. Una de ellas es la exposición de cómo evolucionaron en Alemania las investigaciones acerca de la localización de blancos mediante ondas materiales subacuáticas y ondas radioeléctricas, y los equipos de ellas derivadas, a lo largo de la guerra. Fueron famosos los radares Freya, de alerta aérea, y Seetakt, de vigilancia marítima. Llamará la atención este aspecto a los conocedores del tema; en el transcurso de sus páginas verán aparecer, y actuar e interactuar, a personas y organizaciones, y aparatos y dispositivos hoy considerados clásicos, cuyos nombres sin duda les serán familiares. Por otra parte, se ofrece una exposición detallada del funcionamiento de una empresa industrial en la Alemania en guerra, apoyada en una documentación que revela cómo se llevaban a cabo las actividades industriales en tan singulares circunstancias.

Es este libro, cuya versión en lengua inglesa se llevó a cabo bajo los auspicios del Institute of Physics Publishing, una obra de carácter esencial para quienes las historia de la ciencia, técnica, industria y milicia del siglo XX sean temas de su interés. Pero la exposición no carece de la amenidad suficiente para atraer a lectores cualesquiera y, como atención a la curiosidad de éstos, aquellos puntos cuya exposición requiere conocimientos especializados por parte del lector se presentan en párrafos impresos en negrita, párrafos que pueden eludirse sin que se pierda el hilo narrativo.

—J. Vilardell

mulación de la mecánica cuántica, construida sobre magnitudes matemáticas que él denominó “números q”. Resultó que no sólo era equivalente a la versión matricial de la mecánica cuántica desarrollada por Heisenberg, Max Born y Pascual Jordan, sino también concordante con la mecánica ondulatoria que Erwin Schrödinger presentó en 1926. El mismo se encargó de aclarar la relación exacta entre las diversas versiones en el otoño de 1926, en un artículo “Sobre la teoría de la mecánica cuántica”, que se considera uno de los pilares de la física moderna. Pasa unos meses con Bohr en Copenhague y con Heisenberg en Göttingen. De esas estancias, sumamente provechosas, salieron sus trabajos sobre la teoría de la transformación de la mecánica cuántica y su teoría cuántica de la radiación electromagnética.

Pese a sus primeros éxitos en teoría cuántica, su principal contribución se produjo en 1928 con la teoría relativista del electrón. La mecánica cuántica original de Heisenberg, Dirac y Schrödinger era no relativista, es decir, válida sólo para partículas que se movieran con lentitud (en comparación con la velocidad de la luz). Guiado por principios muy generales de invarianza Dirac encontró una ecuación que satisfacía las exigencias básicas de la relatividad y de la mecánica cuántica. Siguiendo un camino que era esencialmente matemático, llegó a una ecuación a partir de la cual pudo deducir el espín correcto del electrón. Y lo que era de resaltar, esa magnitud importante no se introducía en la teoría, sino que se deducía de ella.

La mina escondida en la ecuación fue descubierta por el propio Dirac. En su análisis de la ecuación, observó que incluía soluciones que se referían a partículas con energía negativa. Las partículas reales debían tener energía positiva. En 1931 postuló la existencia del antielectrón, una nueva clase de partícula, desconocida por los físicos experimentales, que posee la misma masa que el electrón, aunque de carga opuesta. Fue más lejos. El protón tendría su propia antipartícula, un antiprotón dotado de carga negativa. Anunció también la existencia de cargas magnéticas análogas a las

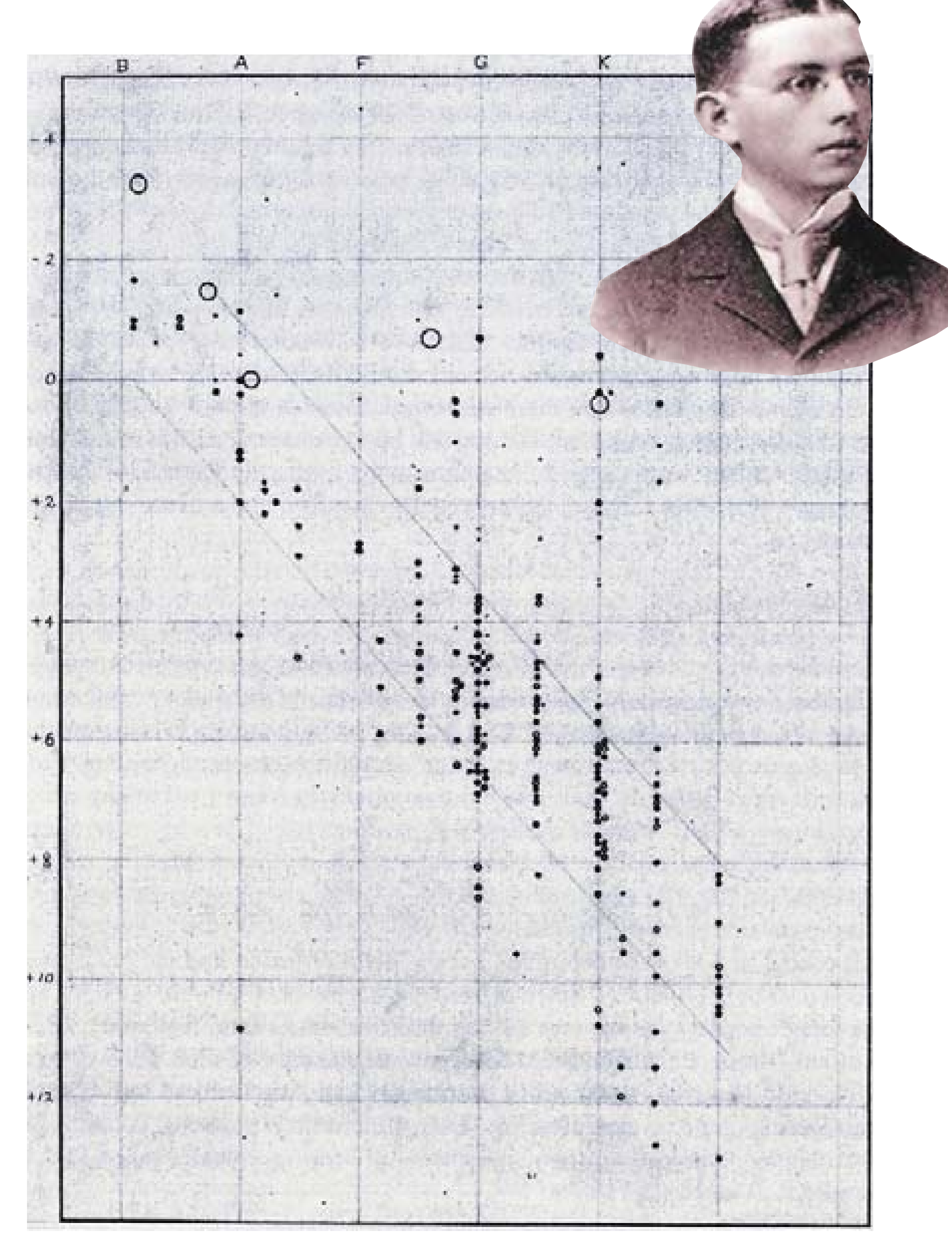


Diagrama presentado por Russell en 1913. El tamaño de los puntos es proporcional al grado de error posible. Los círculos huecos designan estrellas con sólo una tanda de observaciones de la paralaje

cargas eléctricas, los llamados monopolos magnéticos. Unos años más tarde defendió que la completa simetría entre partículas y antipartículas implicaría probablemente la existencia no sólo de antiátomos, sino de antimundos enteros también.

Pero, ¿dónde se encontraban esas antipartículas? A finales de 1932, Carl D. Anderson, en el Caltech, publicó sus observaciones sobre una partícula dotada de carga positiva, de masa inferior a la del protón, en la radiación cósmica. En un principio Anderson lo creyó un acontecimiento raro. Pero en febrero de 1933, Blackett y Giuseppe Occhiliani resumían su análisis de unas 500 trazas de partículas de rayos cósmicos, 14 de las cuales eran prueba de un electrón positivo o anti-electrón, que vincularon explícitamente con la teoría relativista del electrón propuesta por Dirac.

La existencia del antiprotón no se reveló hasta 1955, en un acelerador de partículas, y en 1996 los físicos pudieron informar de la detección de un anti-átomo, el anti-hidrógeno. Pese a algunas alegaciones en contrario, no se ha detectado todavía el monopolo magnético de Dirac, ni en la naturaleza ni en los experimentos.

Si la realidad del espaciotiempo de la teoría general de la relatividad se corroboró en 1919, en las fotografías que Sir Arthur Edington tomó en la isla Príncipe durante un eclipse solar, la astrofísica ha ayudado al desarrollo de la física de partículas, al tiempo que se ha beneficiado de ésta (*Henry Norris Russell* y *Walter Baade*). Russell (1877-1957) sacó a la astronomía de la historia natural para convertirla en pieza imprescindible de la nueva filosofía natural; hizo de la física atómica el centro de la astrofísica de la primera mitad del siglo XX.

Había entrado ya el espectroscopio en los observatorios, con lo que ello suponía para conocer la termodinámica de la radiación e inferir la constitución de planetas, estrellas y nebulosas. Pero no se requería particular bagaje teórico para describir la estructura del "universo sideral". Algunos intentos de crear modelos del átomo basados en pruebas astronómicas fracasaron. Parecía más prudente atenerse a una astronomía espectroscópica ceñida a la morfología y la normalización de los cuerpos celestes.

Contra esa corriente se revela Russell, formado en Princeton y en Cambridge. En 1913 descubrió que la magnitud absoluta (la de una estrella distante 10 parsec del Sol) guardaba correlación con su clase espectral, que era indicativa de la temperatura de superficie y estaba relacionada con su color. Expuso sus hallazgos en un gráfico donde aparecía la magnitud fotográfica absoluta en función de la clase espectral (o temperatura): diagrama de Hertzsprung-Russell.

Con el diagrama H-R se infiere la paralaje, es decir, la distancia deducida mediante la comparación entre la magnitud absoluta y la magnitud aparente, determinada a partir de las características espectrales de la estrella. Para Russell, además, el diagrama representaba una trayectoria en cuyo recorrido las estrellas evolucionaban en gigantes azules brillantes y terminaban en enanas rojas frías. Al estudiar, a partir de su espectro, la composición química de una enana amarilla (el Sol) llegó a la conclusión, en 1929, de que el hidrógeno constituía hasta el 60 por ciento del volumen solar.

Manual perdurable

CLASSICAL ELECTRODYNAMICS, por Walter Greiner. Springer Verlag, Nueva York, 1998.

El libro pertenece a la colección *Classical Theoretical Physics*, y constituye un valioso manual para una asignatura de electricidad y magnetismo. Exige que el estudiante posea una base matemática (los cursos de cálculo y métodos matemáticos) para poder afrontarlo. Pero no más que otras obras que cubren la misma materia: el lenguaje formal empleado es el necesario. Si hubiera que comparar este ejemplar con otras monografías, hasta podría decirse que en este aspecto resulta más asequible. Además, se consagran dos capítulos enteros, casi al principio del libro, a desbrozar los cálculos que se utilizan para algunos temas específicos, como el de los momentos multipolares. El contenido se agrupa en tres grandes apartados: electrostática, magnetostática y electrodinámica. Es completo y adecuado en lo esencial. Omite, sin embargo, algunos temas secundarios, como la magnetohidrodinámica, y la relatividad sólo se toca brevemente al final. Empleado como manual, es de fácil manejo: figuras claras que ayudan a seguir el texto, exposiciones rigurosas y precisas, y un índice que, si bien peca de breve, contiene lo fundamental. Ayuda también la elección de una notación sencilla y el cuidado en la edición para que las fórmulas resulten fácilmente legibles.

Lo más atractivo del libro, y quizá la diferencia más sobresaliente respecto a otros que tratan de la misma materia, es la gran cantidad de ejemplos prácticos —deben pasar del centenar— completamente resueltos. Se ilustran los conceptos con casos particulares, escogidos con esmero, a veces enunciados en forma de problemas. Así, tras la explicación de las leyes de Maxwell, se pone por obra lo expuesto en nueve aplicaciones, para hallar desde la energía del campo magnético creado por una bobina hasta la presión de radiación que da forma a la cola de los cometas. Además del valor que tienen en sí mismos como glosa de las situaciones más relevantes, estos ejemplos, elaborados con todo detalle, constituyen una guía preciosa para el estudiante, que con frecuencia se encuentra en los manuales con ejercicios propuestos (pero sin resolver paso a paso) o con problemas al final de cada capítulo de los que sólo se indica, si acaso, el resultado. Al ir entremezclados con las secciones explicativas, confieren una amenidad de la que carecen otras obras, quizá más formales.

La originalidad de reseñar algunas notas bibliográficas al final de cada capítulo resulta interesante, al igual que la inclusión de un tema sobre la historia de la electrodinámica, colocado al final —casi a modo de apéndice—, con un sumario de las contribuciones de los científicos más relevantes.

—A. GARCIMARTÍN

A la evolución del universo se aplicó también Walter Baade, quien descubrió la existencia de poblaciones estelares jóvenes y viejas. Abría ese hallazgo un horizonte de investigación del que surgió nuestro conocimiento actual sobre la formación estelar y evolución de las galaxias. Desplegó su actividad, sin embargo, en un tiempo en que no había telescopios espaciales, ni astronomía ultravioleta ni de rayos X, muy poca en infrarrojos y, sólo al final de su vida académica, radioastronomía.

Baade había nacido en 1893 en una pequeña localidad de Westfalia. Tras un primer año en la Universidad de Münster, se trasladó a la de Göttingen, donde tuvo por maestros a David Hilbert y Félix Klein en matemática, Johannes Hartmann y Leopold Ambronn en astronomía y a Emil Wiechert en geofísica. Bajo la dirección de Hartmann preparó su tesis sobre el espectro y órbita de β Lyrae. Sus resultados confirmaron los avanzados por Ralph H. Curtiss. Quedaba comprobado que β Lyrae consta de dos estrellas, una brillante (B5) y otra débil (B8).

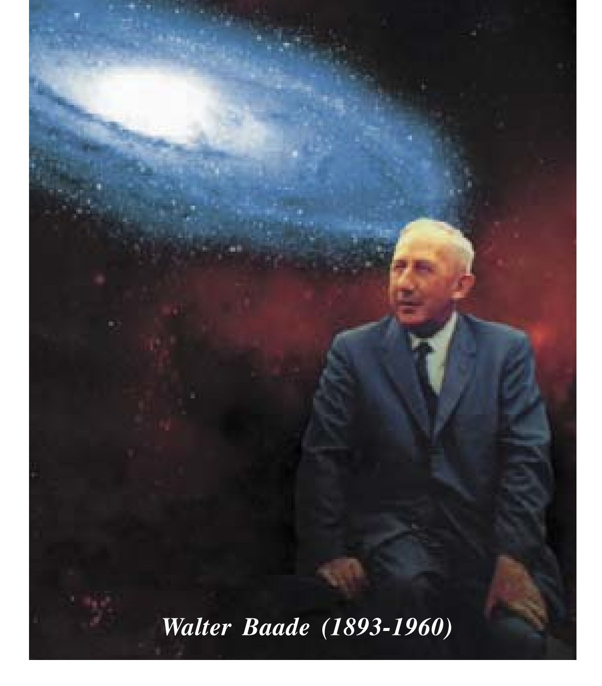
En 1920, instalado ya en el observatorio de Hamburgo, comenzó un trabajo rutinario sobre la nebulosa de Orion, cúmulos estelares, novas y estrellas variables. Tomó cinco placas de la nova que Max Wolf había descubierto en la galaxia espiral NGC 2608. Wolf y Baade reconocieron que la nova, tan brillante casi como la galaxia entera donde se hallaba, era una nova sumamente especial. En 1921 dio su primer paso en investigación galáctica. Tomó seis placas de la "nebulosa" espiral M 33, en realidad un sistema estelar gigante parecido a la Vía Láctea. Comparando esas placas entre sí halló tres variables, estrellas iguales a las de nuestra galaxia pero en otra galaxia.

Marchó a los Estados Unidos en 1931, incorporándose en el equipo investigador del observatorio de Monte Wilson, que alojaba el mayor telescopio del mundo. Tras un programa sistemático de observación llegó a la conclusión de que las nebulosas de emisión, extinción por polvo y estrellas O y B de alta luminosidad iban siempre asociadas. Eran objetos de una población I puros. Los brazos espirales constituían estructuras contempladas en estas nebulosas de emisión, no concentraciones de todos los tipos de estrellas, como habían creído los numerosos teóricos que se había esforzado en hallar una explicación. En 1947 Baade descubrió que los brazos espirales casi desaparecían en las fotografías tomadas en el continuum rojo profundo. "La población II es la columna vertebral de la galaxia entera y la pauta espiral es un adorno deslumbrante, aunque sin consecuencias."

Junto a la astrofísica, otros campos han ido progresando de una manera notable desde mediados del siglo XX. ¿En qué situación nos encontramos? (*The Physics of a Lifetime*). La física ha avanzado y se ha diversificado, sin perder, no obstante, el carácter unitario de sus fundamentos y métodos. Muchas son las cuestiones pendientes en macrofísica, microfísica y astrofísica. Entre los problemas característicos de la primera podríamos mencionar la fusión nuclear controlada, la superconductividad, las transiciones de fase o los núcleos exóticos. Preocupan a la microfísica, entre otros interrogantes, los asociados al desarrollo de la cromodinámica cuántica, las teorías de unificación

o la masa del neutrino. Tiene ante sí la astrofísica un reto permanente; la verificación experimental de la teoría general de la relatividad.

El dominio de la fusión nuclear controlada encuentra su expresión más prometedora en el confinamiento magnético del plasma, mediante unas trampas toroidales a las que llamamos tokamaks. Deberán solucionarse las dificultades que plantean la baja estabilidad de la pared primera del reactor, sometida a un flujo de neutrones de elavadísima intensidad, y la consecución de un calentamiento eficaz del plasma. En otro orden, carecemos de una teoría que describa las transiciones de fase de segundo orden en sistemas tridimensionales.



Walter Baade (1893-1960)

El tamaño atómico (del orden de 10^{-8} cm) y, por supuesto, el tamaño nuclear (del orden de 10^{-13} a 10^{-12} cm) deben considerarse microscópicos. Por tanto, clasificaremos los fenómenos atómicos y nucleares en el dominio de la microfísica, cuya ley básica es la teoría cuántica relativística. Sabemos que antes de 1932 sólo se conocían tres partículas elementales: electrón, protón y fotón. Desde entonces la taxonomía se enriqueció con neutrones, positrones, muones, leptones, mesones, piones, hiperones, partículas de resonancia, neutrinos, antineutrinos, etc. Las partículas se describen por su masa, espín, carga eléctrica, vida media y otros parámetros y números cuánticos. Hacia 1963-64 apareció la hipótesis de los quarks, prototipo de partículas que componen bariones y mesones Todos los quarks tienen espín ½ y, por tanto, son fermiones. Un barión consta de tres quarks. Hay, por lo menos diez tipos de partículas en el modelo quark de la materia. Para explicar el mecanismo de confinamiento de los quarks en los hadrones hemos de acudir a la teoría cromodinámica.

En el atardecer de su vida, Einstein trabajó intensamente en una teorías unificada de campos. Cuando él empezó sólo se conocían dos tipos de interacción, electromagnética y gravitatoria. Más tarde entraron en escena las interacciones débil y fuerte. La investigación actual busca y avanza modelos que superen la teoría unificada de las interacciones débiles y electromagnéticas (interacción electródebil) en una superunificación, que englobe la gravedad.

Nunca dejaron los físicos del siglo XX de pensar qué había más allá de su mundo cuántico. De la mayoría existen testimonios personales o epistolares, de algunos páginas destinadas a la imprenta (*Atom and Archetype. The Pauli/Jung Letters*). Entre otros móviles impulsaron esa tendencia el principio de complementariedad de Bohr y el de incertidumbre de Heisenberg. En el bien entendido, de que, en cuanto tales estipulaciones, no deben sacarse de su genuino sentido físico, so pena de forzar su contenido. Sin embargo, la conciencia de un mundo psicológico, complementario al estudiado por la física, y la intervención de la decisión del sujeto en la orientación del experimento, alentaron una serie de preguntas cuya respuesta requería cierta armazón argumental. Sorprenderá a muchos el conocimiento filosófico de Heisenberg o los análisis del concepto de mal (*privatio boni*) de Pauli.

En el caso de este último las cuestiones filosóficas tienen una raíz personal, introspectiva, la de su desequilibrio emocional (fracaso matrimonial, envenenamiento de su madre, alcoholismo y carácter pendenciero) que busca apoyo en la psicología profunda de Jung. De esa relación salió un libro conjunto: un tratado de Jung sobre la sincronicidad y un ensayo de Pauli sobre las interpretaciones de la naturaleza y psiqué (Naturerklärung und Psyche, 1952). El postulador de la existencia del neutrino y autor del principio de exclusión se manifiesta en numerosas ocasiones explícito sobre la naturaleza analógica entre la esfera física y la esfera psicológica. Con los años se mostrará partidario incluso de una ciencia, dotada de un lenguaje propio, neutro, que pueda abordar ambas conjuntamente.

Con mayor distanciamiento del sujeto, la filosofía de la naturaleza viene dedicándose en los últimos años al estudio de las cuestiones epistemológicas que emergen de la mecánica cuántica (*Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*). Se trata de una disciplina que, por desgracia, no goza de especial cultivo en el mundo hispanohablante. Para abordar la posibilidad de una gravedad cuántica, se requiere, de entrada, cierta soltura en mecánica cuántica y relatividad general. Con esa base, podremos afrontar la revisión que se demanda de los conceptos de espacio, tiempo y materia.

Roger Penrose acota el problema central de la teoría cuántica en la reducción del vector de estado. Se trata de entender de qué modo, a partir de la medición de un sistema cuántico, se produce el colapso de la función de onda. Interviene en la medición el estado cuántico en cuestión imbricado en una parte más extensa del universo físico, es decir, en un aparato de medición. Este, junto con el observador y su entorno común, debe tener también cierta descripción cuántica. En consecuencia, debe haber una descripción cuántica de ese estado cuántico considerado en su integridad. En torno a ese núcleo central giran las distintas interpretaciones de la mecánica cuántica, desde la clásica de Copenhague hasta la de Bohm, de Broglie, Gell-Mann y otros. El problema de la medición es genuinamente filosófico. Como lo son el espacio y el tiempo asociados a la gravedad.

—LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Defensa en profundidad

Imaginemos un partido de fútbol sobre un tablero de seis por seis, en el cual un delantero muy veloz parte del fondo norte del tablero y trata de esquivar a tres defensas del equipo contrario. Según las reglas de este juego, la libertad de movimiento del delantero no es completa: solamente puede desplazarse a una de las tres cuadrículas vacías que estén justo debajo de la que ocupe. Por ser tan veloz, sin embargo, puede en cada turno desplazarse dos cuadros. Los defensas, más lentos, sólo avanzan como máximo uno por turno; tienen permiso, eso sí, para hacerlo a cualquiera de los ocho que rodean al que ocupan o, si lo prefieren, quedarse donde están (*véase la figura A*).

El delantero gana la partida si logra alcanzar el fondo sur del tablero. Los defensas ganan si bloquean al delantero ocupando todos los espacios que tiene ante sí (las casillas situadas inmediatamente al sudeste, sur o sudoeste). Supongamos que el delantero parte de cualquier cuadro del fondo norte. Tras observar de dónde ha arrancando, los tres defensas se situarán en cualquier casilla que se encuentre a una distancia de al menos tres cuadros del rival. En la figura B se muestra una posible configuración inicial. El delantero sale y se desplaza dos cuadros; a continuación cada uno de los defensas efectúa una jugada, y así sucesivamente. ¿Pueden el delantero o los defensas asegurarse la victoria? En tal caso, ¿de qué manera?

Modifiquemos ahora las reglas un poquito. Pongamos que los defensas hayan de partir del fondo sur. Se ofrece en la ilustración C una posible configuración. En estas condiciones, ¿puede alguno de los bandos asegurarse la victoria?

Solución del problema del mes pasado:

A las hadas de la leyenda les atraen los siguientes colores:
a Juliana, el turquesa;
a Katiana, el ocre;
a Oliviana, el color marfil;
a Ania, el verde salvia,
y a Heliana, el verde esmeralda.
Puede verse una explicación completa de la solución en www.investigacionyciencia.es.

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.

